

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Lasse Vuokko

RADIOAALTOJEN ETENEMISMEKANISMIT KAUPUNKIYMPÄRISTÖSSÄ  
2 GHz:N TAAJUUSALUEELLA

TKK Sähkö- ja  
tietoliikennetekniikan kirjasto  
Otakaari 5 A  
02150 ESPOO

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa  
varten Espoossa 20.11. 2001

Työn valvoja



Professori Pertti Vainikainen

Työn ohjaaja



TkL Kati Sulonen

<b>Tekijä:</b>	Lasse Vuokko		
<b>Työn nimi:</b>	Radioaaltojen etenemismekanismit kaupunkiympäristössä 2 GHz:n taajuusalueella		
<b>Päivämäärä:</b>	19.11.2001	<b>Sivumäärä:</b>	71
<b>Osasto:</b>	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
<b>Professori:</b>	S-26 Radiotekniikka		
<b>Työn valvoja:</b>	Professori Pertti Vainikainen		
<b>Työn ohjaaja:</b>	TkL Kati Sulonen		
<p>Tässä diplomityössä tutkittiin radioaaltojen etenemismekanismeja kaupunkiympäristössä, verrattiin saatuja tuloksia etenismalleihin sekä pohdittiin etenismallien lähtöoletusten pätevyyttä.</p> <p>Ensin perehdyttiin radioaaltojen etenemiseen yleensä, sekä etenemisen erityispiirteisiin kaupunkiympäristössä. Seuraavaksi luotiin karkeat luokittelukriteerit käsiteltyjen mittaustulosten erittelyyn eri etenemismekanismeiksi. Käsitellyt mittaustulokset kattavat mikro- ja makrosolu ympäristöjä kaupunkialueella ja sisältävät mm. vastaanotettujen radioaaltojen tulosuunnat ja amplitudit.</p> <p>Vastaanotetut radioaallot luokiteltiin kolmeen luokkaan niiden tulosuunnan perusteella. Ensimmäiseen luokkaan otettiin katukuilua pitkin edenneet signaalit, toiseen suoraan tukiasemalta rakennusten yläpuolella edenneet ja kolmanteen loput. Jaottelu perustuu kiinteään elevaatorajaan ja tukiaseman atsimuuttisuunnan seurantaan.</p> <p>Tulosten perusteella mikrosolu ympäristössä noin 90% tehosta etenee pitkin katukuilua. Tutkituissa pienissä makrosoluissa katukuiluetenemisen osuus vastaanotetusta tehosta oli 30-40% ja suoraan tukiasemalta vastaanottoon rakennusten yli edenneen vain hieman yli 10%. Valtaosa tehosta eteni käyttäen muita etenemismekanismeja. Makrosolussa muuksi etenemiseksi eritellyn tehon tarkempi tutkiminen osoitti sen koostuvan pääosin pienestä määrästä voimakkaita sirottavia tai diffraktoivia kohteita katukuilun yläreunassa tai keskimääräisen kattotason yläpuolella. Näitä etenismallit eivät huomioineet.</p>			
<b>Avainsanat:</b>	Radioaaltojen etenemismekanismit, etenismallit		



<b>Author:</b>	Lasse Vuokko		
<b>Name of the thesis:</b>	Radio wave propagation mechanisms in city environment at 2 GHz frequency range		
<b>Date:</b>	November 19, 2001	<b>Number of pages:</b>	71
<b>Department:</b>	Department of Electrical and Communications Engineering		
<b>Professorship:</b>	S-26 Radio Engineering		
<b>Supervisor:</b>	Professor Pertti Vainikainen		
<b>Instructor:</b>	Kati Sulonen, Lic.Sc. (Tech.)		
<p>In this master's thesis radio wave propagation mechanisms in city environment were studied. Measurement results were compared to existing propagation models. Also validity of the models was considered.</p> <p>First part of this thesis presents the basic radio wave propagation phenomena and the special issues of radio wave propagation in city environment. Next rough categorization criteria for the measured data used in this thesis were created. The measured data consist of microcellular and macrocellular measurements carried out in a city environment. The data contains direction of arrival and amplitude of each received radio wave among other things.</p> <p>The categorization of the received radio waves was based on the waves direction of arrivals. All waves propagated along street canyons were categorized to first class. Second class consists of waves propagated directly over buildings from transmitter. The rest were categorized as third class. The categorization was based on constant elevation boundary and tracing of transmitter's azimuthal direction.</p> <p>According to results, approximately 90% of total received power propagated along street canyons in microcellular environment. In small macrocells 30-40% of power propagated along street canyons and slightly more than 10% propagated directly over buildings. Most of the power propagated using other mechanisms. More careful investigation of the power categorized as other mechanisms showed that it mostly consists of small number of strong scattering or diffraction sources near the top of a street canyon or above the average rooftop level. Propagation models did not take those mechanisms into account.</p>			
<b>Keywords:</b>	Radio wave propagation, propagation mechanisms, propagation models		

## Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Radiolaboratoriossa Teknillisessä korkeakoulussa.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Pertti Vainikaista kaikista neuvoista, kommenteista ja rakentavista ehdotuksista, joita ilman tämä työ ei olisi ollut mahdollinen.

Lisäksi kiitän työn ohjaajaa Kati Sulosta saamastani avusta, käytännön vihjeistä ja ennen kaikkea lukuisista diplomityön ulkoasuun ja kielioppiin liittyvistä korjauksista.

Espoossa 19.11.2001



Lasse Vuokko



## Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	2
Abstract .....	3
Alkulause .....	4
Sisällysluettelo .....	5
Symboliluettelo .....	6
Lyhenneluettelo .....	9
1 Johdanto .....	11
2 Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä .....	13
2.1 Vapaa tila .....	13
2.2 Heijastuminen ja läpäisy .....	14
2.3 Taittuminen .....	16
2.4 Sironta .....	19
2.5 Monitie-eteneminen kaupunkiympäristössä .....	20
3 Etenemismallit kaupunkiympäristössä .....	24
3.1 COST231-Walfisch-Ikegami .....	25
3.2 Har-Xia-Bertoni .....	27
3.3 Säteenseuranta .....	29
4 Etenemismekanismit ja niiden tunnistaminen .....	32
4.1 Katukuilussa eteneminen .....	32
4.2 Kattojen yli eteneminen .....	34
4.3 Muut mekanismit .....	35
4.4 Luokittelukriteereitä .....	36
5 Laitteisto ja käsiteltävät ympäristöt .....	38
5.1 Laitteistokuvaus .....	38
5.2 Pallon muotoinen antenniryhmä .....	40
5.3 Käsiteltävät ympäristöt .....	41
5.4 Atsimuuttirajauksen vaikutus tuloksiin .....	42
5.5 Elevaatorajauksen vaikutus tuloksiin .....	44
6 Tulokset .....	46
6.1 Etenemismekanismit mikrosolussa eri tukiasemakorkeuksilla .....	46
6.2 Etenemismekanismit pienessä makrosolussa .....	54
6.3 Tarkempaa etenemismekanismien erittelyä .....	61
7 Johtopäätökset .....	67
Kirjallisuusviitteet .....	69

## Symboliluettelo

$A_e$	Antennin sieppauspinta
$A_i$	Vastaanotetun reitin $i$ amplitudi
$b$	1. Fresnelin vyöhykkeen säde, korttelin leveys
$b_{\max}$	1. Fresnelin vyöhykkeen maksimisäde
$d$	Etäisyys
$d_1$	Etäisyys lähettimestä esteeseen
$d_2$	Etäisyys esteestä vastaanottimeen
$D$	Diffraktiokerroin
$D^{(l)}$	Diffraktiokerroimen $l$ :s aputermi
$E_0$	Lähetetty sähkökenttä
$\overline{E_1}$	Saapuva sähkökenttä
$E_1'$	Heijastunut sähkökenttä
$E_{UTD}$	Diffraktoitunut sähkökenttä
$f$	Taajuus
$f_{\min}$	Minimi yksikäsitteinen mittaustaajuus
$F(v)$	Veitsenterädiffraction vaimennus
$G$	Vahvistus
$G_{rx}$	Vastaanottoantennin vahvistus
$G_{tx}$	Lähetyksantennin vahvistus
$h(t)$	Impulssivaste
$h_b$	Tukiaseman korkeus maanpinnasta
$h_{Base}$	Tukiaseman korkeus
$h_m$	Vastaanottimen korkeus maanpinnasta
$h_{Mobile}$	Vastaanottimen korkeus
$h_{Roof}$	Rakennusten korkeus
$\Delta h$	Tukiaseman ja keskimääräisen kattotason välinen korkeusero
$\Delta h_m$	Vastaanottimen ja lähimmän katonreunan välinen korkeusero
$H$	Esteen korkeus
$\overline{H_1}$	Saapuva magneettikenttä
$H_1'$	Heijastunut magneettikenttä
$k$	Aaltoluku
$k_a$	Kattotason alapuolisen tukiaseman lisävaimennus

$k_d$	Moninkertaisten diffraktioiden ja etäisyyden välinen yhteys
$k_f$	Moninkertaisten diffraktioiden ja taajuuden välinen yhteys
$L$	Vaimennus, pituus
$L_0$	Vapaan tilan vaimennus
$L_{bsh}$	Tukiasemakorkeuden vaikutus vaimennukseen
$L_{msd}$	Moninkertaisen diffraktioiden vaikutus vaimennukseen
$L_{Ori}$	Kadun suunnan vaikutus vaimennukseen
$L_{rts}$	Katon reunasta katukuiluun kytkeytymisen vaikutus vaimennukseen
$n$	Skaalattu diffraktoivan kiilan sivujen välinen kulma
$\bar{n}$	Tason normaalivektori
$P_d$	Tehotiheys
$P_r$	Heijastunut teho
$P_{rel}$	Suhteellinen tehotaso
$P_{rx}$	Vastaanotettu teho
$P_{TE}$	TE-polarisaatiolla heijastunut teho
$P_{TM}$	TM-polarisaatiolla heijastunut teho
$P_{tx}$	Lähetysteho
$PL$	Etenemisvaimennus, suhteellinen tehotaso
$r$	Etäisyys, säde
$r_1$	Etäisyys lähettimestä diffraktoivaan veitsenterään
$r_2$	Etäisyys diffraktoivasta veitsenterästä vastaanottimeen
$r_h$	Vastaanottimen ja lähimmän katonreunan välinen etäisyys
$R$	Etäisyys, pallon säde
$R_0$	Diffraktoivan kiilan pinnan heijastuskerroin
$R_{bk}$	Murtopisteen etäisyys
$R_n$	Diffraktoivan kiilan pinnan heijastuskerroin
$R^{TE}$	TE-polarisaation heijastuskerroin
$R^{TM}$	TM-polarisaation heijastuskerroin
$s$	Matka, etäisyys diffraktoivasta kiilasta vastaanottimeen
$s'$	Etäisyys lähettimestä diffraktoivaan kiilaan
$T$	Läpäisykerroin, mittausaika
$T_{ei}$	Läpäisykerroin eristeestä ilmaan
$T_{ie}$	Läpäisykerroin ilmasta eristeeseen
$T^{TE}$	TE-polarisaation läpäisykerroin
$T^{TM}$	TM-polarisaation läpäisykerroin
$v$	Veitsenterädiffraktion parametri
$w$	Kadun leveys



$\alpha$	Väliaineen vaimennuskerroin, apukulma
$\beta$	Diffraktoivan reunan ja saapuvan säteen välinen kulma
$\gamma$	Saapuvan säteen ja heijastavan tason välinen kulma
$\gamma^{(l)}$	Diffraktoivan kiilan $l$ :s apukulma
$\delta(t)$	Delta-funktio
$\bar{\varepsilon}$	Normalisoitu permittiivisyys
$\varepsilon_1$	Väliaineen 1 permittiivisyys
$\varepsilon_2$	Väliaineen 2 permittiivisyys
$\varepsilon_r$	Suhteellinen permittiivisyys
$\theta_E$	Elevaatorajauksen rajakulma
$\theta_i$	Vastaanotetun reitin $i$ vaihekulma
$\lambda$	Aallonpituus
$\mu_1$	Väliaineen 1 permeabiliteetti
$\mu_2$	Väliaineen 2 permeabiliteetti
$\rho_s$	Sirontavaimennus
$\sigma(\gamma)$	Tutkapoikkipinta-ala
$\sigma_h$	Korkeuden keskihajonta
$\tau_i$	Vastaanotetun reitin $i$ etenemisviive
$\Delta\tau$	Viiveresoluutio
$\varphi$	Kadun suunta
$\phi_1$	Saapuvan säteen ja heijastavan tason normaalin välinen kulma
$\phi_1'$	Heijastuneen säteen ja heijastavan tason normaalin välinen kulma
$\phi_2$	Heijastavan tason läpäisseen säteen ja tason normaalin välinen kulma
$\phi_B$	Tukiaseman suunta atsimuuttitasossa
$\Delta\phi$	Atsimuuttirajauksen leveys

## Lyhenneluettelo

AGC	Automatic Gain Control Automaattinen vahvistuksen säätö
BPSK	Binary Phase Shift Keying Binäärinen vaihemodulaatio
COST	European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research
COST231-WI	COST231 Walfisch-Ikegami
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Element Method
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
HXB	Har-Xia-Bertoni
IDC	Institute of Digital Communications Teknillisen korkeakoulun digitaalisen tietoliikenteen instituutti
LOS	Line of Sight Näköyhteys
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	Non-Line of Sight Näköyhteydetön
RF	Radio Frequency Radiotaajuinen
RMS	Root Mean Square
RX	Receiver Vastaanotin
TE	Transverse Electronic field Poikittainen sähkökenttä
TM	Transverse Magnetic field Poikittainen magneettikenttä

TX	Transmitter Lähetin
UTD	Uniform Theory of Diffraction



# 1 Johdanto

Tieto tai luotettavat arviot etenemisvaimennuksesta eri tukiaseman ja vastaanottimen sijainneilla ovat tärkeitä tehokkaan verkkosuunnittelun kannalta. Etenkin mikrosoluissa ennustettua pienempi etenemisvaimennus lisää tuntuvasti interferenssitason ympäröivissä soluissa ja laskee siten niiden kunnollista kuuluvuusaluetta ja verkon kokonaiskapasiteettia. Jos etenemisvaimennusta ei tunneta riittävän hyvin, ei samaa tai edes viereisiä taajuusalueita, kanavia, voida käyttää tehokkaasti uudelleen. Vastaavasti jos todellinen etenemisvaimennus on ennustettua suurempi, radioverkkoon voi jäädä tahattomia katvealueita solun peittoalueen jäädessä haluttua pienemmäksi.

Yleisesti radioverkkojen solut jaotellaan piko-, mikro- ja makrosoluiksi. Makrosoluissa tukiasema on sijoitettu korkealle ja kantama voi olla kymmeniä kilometrejä. Mikrosoluissa tukiasema sijoitellaan kaupunkialueelle kattotason alapuolelle. Se palvelee pientä aluetta alle 1 km etäisyydellä tukiasemasta. Pikosolut ovat mikrosoluja pienempiä, tukiasema on mahdollisesti sisätiloissa ja se kattaa ainoastaan tukiaseman läheisyyden korkeintaan muutaman sadan metrin päähän.

Eri solutyypeillä on selkeästi erilaiset käyttöympäristöt. Makrosolut soveltuvat hyvin alueille, jossa verkon käyttömäärä on pieni ja katettava maapinta-ala suuri. Mikrosolu soveltuu tiheämmin rakennetulle kaupunkialueelle, missä verkon käyttäjiä on tiheässä. Pikosoluja voidaan käyttää, kun käyttäjiä on tiheässä erittäin pienellä alueella tai sisätiloissa. Ideana solukoon pienentämisessä on kyetä hyödyntämään samat taajuusalueet entistä lähempänä uudestaan.

Etenemisvaimennuksen arviointiin verkkosuunniteluohjelmistot käyttävät lukuisia erilaisia etenemismalleja. Tyypillisesti etenemismallit olettavat yhden tai kahden tietyn etenismekanismin olevan dominoivia ja rakentuvat niiden tilastolliseen mallintamiseen mittaustulosten tai laskelmien pohjalta eri etäisyyksillä ja erilaisissa ympäristöissä. Usein mallien lähtöoletus on, että mikrosolussa radioaallot etenevät pitkin katuja ja makrosoluissa radioaallot etenevät rakennusten yläpuolella diffraktoituen sitten vastaanotinta ympäröivistä rakennuksista kadulle, jos ympäröiviä rakennuksia yleensäkin on.

Tässä diplomityössä luodaan karkeat luokittelukriteerit eri etenismekanismeille kaupunkialueella ja näitä kriteereitä käyttäen analysoidaan mittaustuloksia. Saatavien tulosten perusteella arvioidaan eri mekanismien merkittävyyttä erilaisissa ympäristöissä. Vertaamalla saatuja tuloksia etenemismalleihin voidaan arvioida niiden luotettavuutta sekä sitä ovatko etenemismallien kehityksessä käytetyt oletukset olleet järkeviä. Analysoitavat mittaukset on tehty Helsingissä 2 GHz:n taajuusalueella kesällä 2000. Mitatut ympäristöt vastaavat mikrosolua ja pientä makrosolua.

Diplomityön luvussa 2 käydään läpi radioaaltojen etenemisen perusteita. Luvussa 3 käsitellään kaupunkiympäristössä pienillä etäisyyksillä sovellettavia etenemismalleja.

Luvussa 4 määritellään kolme luokkaa eri etenismekanismien karkeaan luokitteluun sekä soveltuvat riittävän yksinkertaiset kriteerit luokittelun tekemiseksi suurelle määrälle mittaustuloksia. Luku 5 käsittelee mittauslaitteistoa ja ympäristöjä, joissa kaikki työssä analysoitavat mittaukset on suoritettu. Tulokset esitetään luvussa 6 ja johtopäätökset luvussa 7.



## 2 Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

### 2.1 Vapaa tila

Yksinkertaisin esimerkki radioaaltojen etenemisestä on vapaan tilan eteneminen. Tällöin oletetaan, ettei etenemisreitillä ole minkäänlaisia esteitä tai heijastavia pintoja ja että antennit eivät sijaitse toistensa lähikentässä. Nämä edellytykset takaavat, että teho ei absorpoidu mihinkään matkalla eikä monitie-etenemistä ilmene.

Vapaan tilan etenemisessä ei ole heijastuksia, joten vastaanotettava teho ja kentänvoimakkuus voidaan laskea suoraan, kun tiedetään antennien välinen etäisyys ja lähetetty teho. Tehotiheys tietyllä etäisyydellä lähetysantennista on verrannollinen pinta-alaan, jolle lähetetty teho on levinnyt. Tiettyyn suuntaan lähtevää tehoa kuvaa antennin vahvistus  $G_{tx}$  ja lähetysteho  $P_{tx}$ . Koska radioaallot etenevät likimain suoraan, leviää teho pallopinnan tavoin. Tällöin etäisyydellä  $r$  oleva vastaanottoantenni näkee tehotiheyden

$$P_d = \frac{G_{tx} P_{tx}}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Kaavasta (1) nähdään, että vastaanotettava tehotiheys on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Vastaanottoantennissa on sieppauspinta  $A_e$  ottamassa tehoa vastaan. Vastaanotettava teho on siis

$$P_{rx} = A_e P_d \quad (2)$$

Toisaalta antennin vahvistuksen ja sieppauspinnan välinen suhde on [1]

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (3)$$

missä  $\lambda$  on käytetty aallonpituus. Kun kaavat (1)-(3) yhdistetään, saadaan vastaanotettavan tehon  $P_{rx}$  lauseke, joka kuvaa radioaallon vaimenemista vapaan tilan etenemisessä.

$$P_{rx} = \frac{G_{rx} G_{tx} \lambda^2}{(4\pi r)^2} P_{tx} \quad (4)$$

Vapaan tilan etenemismallia voidaan käyttää ainoastaan laskettaessa näköyhteyslinkkejä. Suurilla taajuuksilla, erityisesti millimetrialueella, huomioon pitää ottaa myös ilmakehän ja säävaihteluiden aiheuttamat lisävaimennukset.



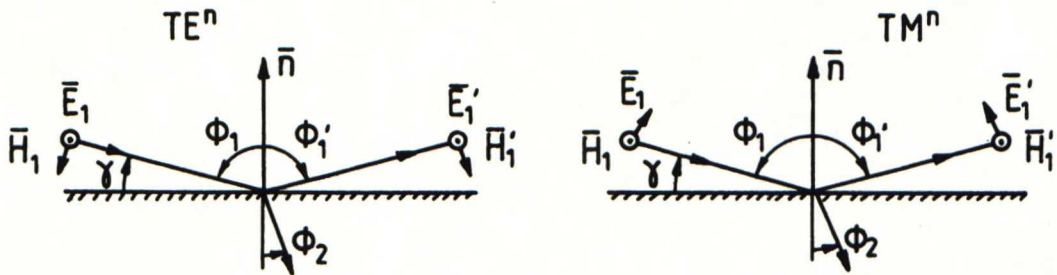
## 2.2 Heijastuminen ja läpäisy

Kun radioaalto kohtaa rajapinnan, oli se sitten talon seinä, tie tai jokin muu, osa tehosta taittuu rajapinnan sisään ja osa heijastuu eteenpäin.

Radioaallon heijastuessa heijastuskulma on sama kuin tulokulma, kuten näkyvälläkin valolla. Heijastuvan tehon määrä riippuu tulokulmasta  $\gamma$  tai  $\phi_1$ , materiaalien permittiivisyyksien suhteesta

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (5)$$

ja etenevän kentän polarisaatiosta (kuva 1). Kun kenttä jaetaan heijastavan pinnan suhteen TE- ja TM-aalloiksi, saadaan niitä vastaavat heijastuskertoimet  $R^{TE}$  ja  $R^{TM}$  kaavoista (6) ja (7) [2]. Tässä TE-aallolla tarkoitetaan aaltoa, jonka sähkökenttä on yhdensuuntainen heijastavan pinnan kanssa. TM-aallolla vastaavasti magneettikenttä on yhdensuuntainen heijastavan pinnan kanssa. Vaihtoehtoisesti kenttä voidaan jakaa yhdensuuntaiseen polarisaatioon ja kohtisuoraan polarisaatioon. Yhdensuuntaispolarisaatio vastaa TM-polarisaatiota ja kohtisuorapolarisaatio TE-polarisaatiota.



Kuva 1. Heijastava rajapinta sekä TE- että TM-polarisaatiolla.

$$R^{TE} = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\bar{\varepsilon} - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\bar{\varepsilon} - \cos^2 \gamma}} \quad (6)$$

$$R^{TM} = \frac{\bar{\varepsilon} \sin \gamma - \sqrt{\bar{\varepsilon} - \cos^2 \gamma}}{\bar{\varepsilon} \sin \gamma + \sqrt{\bar{\varepsilon} - \cos^2 \gamma}} \quad (7)$$

Kokonaisuudessaan heijastuva teho  $P_r$  on siis

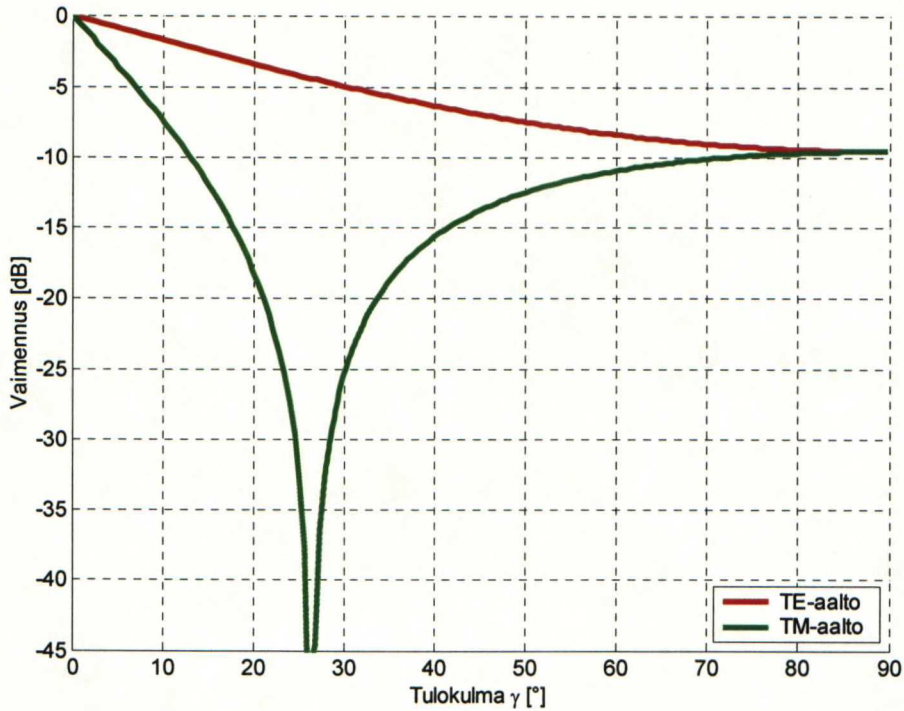
$$P_r = (R^{TE})^2 P_{TE} + (R^{TM})^2 P_{TM} \quad (8)$$

kun  $P_{TE}$  on se osuus etenevästä tehosta, jonka sähkökenttä on poikittainen heijastavan tason kanssa, ja  $P_{TM}$  se osuus, jonka magneettikenttä on poikittainen tason kanssa.

## 2. Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

Aallon heijastuessa maasta TE-aalto vastaa vaakapolarisaatiota ja TM-aalto pystypolarisaatiota.

Kuvassa 2 on esitetty heijastuksen aiheuttama vaimennus tulokulman funktiona sekä TE- että TM-aallolle, kun heijastavana pintana on häviötön kuiva maa,  $\varepsilon_r = 4$ . Kuvasta erottuu myös Brewsterin kulma, jolla yhtään tehoa ei heijastu TM-polarisaatiolla.



Kuva 2. Heijastusvaimennus.

Heijastumaton osa kentästä etenee kappaleen sisään. Tätä merkitään läpäisykerroimella  $T$ . Se on laskettava erikseen sekä TE- että TM-aallolle, kaavat (9) ja (10) [3].

$$T^{TE} = 1 + R^{TE} \quad (9)$$

$$T^{TM} = (1 + R^{TM}) \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \quad (10)$$

missä kulma  $\phi_1 = \pi/2 - \gamma$  ja  $\phi_2$  saadaan Snellin laista (11) tulokulman ja materiaaliparametrien  $\varepsilon_{1,2}$  ja  $\mu_{1,2}$  avulla.

$$\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1} \sin \phi_1 = \sqrt{\mu_2 \varepsilon_2} \sin \phi_2 \quad (11)$$

Laskettaessa esteen läpäisyvaimennusta on huomioitava läpäisykerroin ilmasta esteeseen,  $T_{ie}$ , ja esteestä ilmaan,  $T_{ei}$ , mahdollisesti häviöllisen väliaineen vaimennuskerroin,  $\alpha$ , ja esteessä edetty matka,  $s$ . Jos moninkertaisia heijastuksia esteen sisällä ei huomioida, saadaan läpäisyvaimennus  $L$

$$L = 20 \log(|T_{ie}| |T_{ei}|) - \alpha s \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Läpäisyvaimennuksen laskemista hankaloittaa se, että  $T_{ie}$ ,  $T_{ei}$  ja  $s$  riippuvat tulokulmasta  $\gamma$ . Tyypillisesti esimerkiksi betoniseinän läpäisyvaimennus on luokkaa 8-15 dB ja lattian 10 dB 1300 MHz taajuudella ja 26-35 dB 1900 MHz taajuudella [4].

### 2.3 Taittuminen

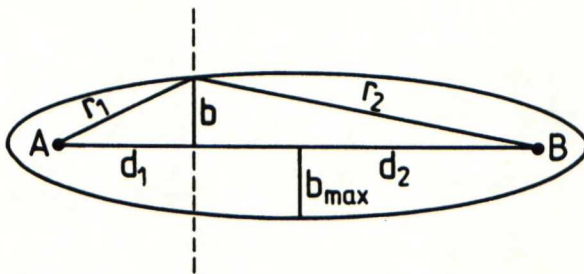
Jotta aalto etenee vapaan tilan etenemisenä, tulee 1. Fresnelin vyöhykkeen olla vapaa esteistä. Huygensin periaatteella voidaan osoittaa, että lähes kaikki teho etenee kyseisen vyöhykkeen sisällä [2]. Jos este peittää osan 1. Fresnelin vyöhykkeestä, alkaa signaali vaimeta. Kun myös näköyhteysreitti peittyy, puhutaan signaalin taittumisesta, diffraktiosta. Diffraktion ansiosta osa tehosta taipuu myös esteen taakse, vaikka lähettimen ja vastaanottimen välillä ei olisikaan suoraa yhteyttä eikä heijastavia pintoja.

1. Fresnelin vyöhykkeen säde,  $b$ , esteen kohdalla on

$$b = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (13)$$

kun  $\lambda$  on aallonpituus ja  $d_1$  sekä  $d_2$  ovat välimatkat antennista esteeseen, kuva 3. Suurimmillaan Fresnelin vyöhyke on yhteysvälin puolivälissä. Tällöin  $d_1 = d_2 = 0.5d$  ja

$$b_{\max} = \frac{\sqrt{\lambda d}}{2} \quad (14)$$



Kuva 3. Fresnelin vyöhyke.

Vaimennuksen määrä riippuu siitä, miten suuren osan vyöhykkeestä este peittää. Tätä kuvaa parametri  $v$

$$v = \sqrt{2} \frac{H}{b} \quad (15)$$

Kaavassa (15)  $b$  on Fresnelin vyöhykkeen säde esteen kohdalla ja  $H$  esteen korkeus mitattuna antennien väliseltä näköyhteysreitiltä.



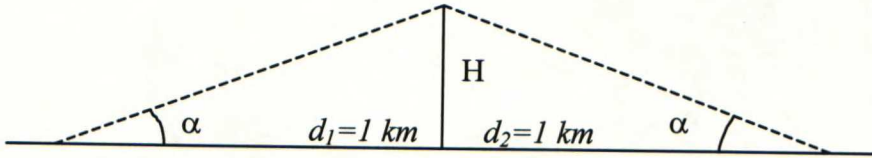
## 2. Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

Kun oletetaan este johtavaksi äärettömän ohueksi levyksi, voidaan vaimennus laskea integraalikaavasta tai sitä vastaavasta approksimaatiosta, joka pätee, kun este peittää edes osin 1. Fresnelin vyöhykkeen, ts.  $v > -1$ .

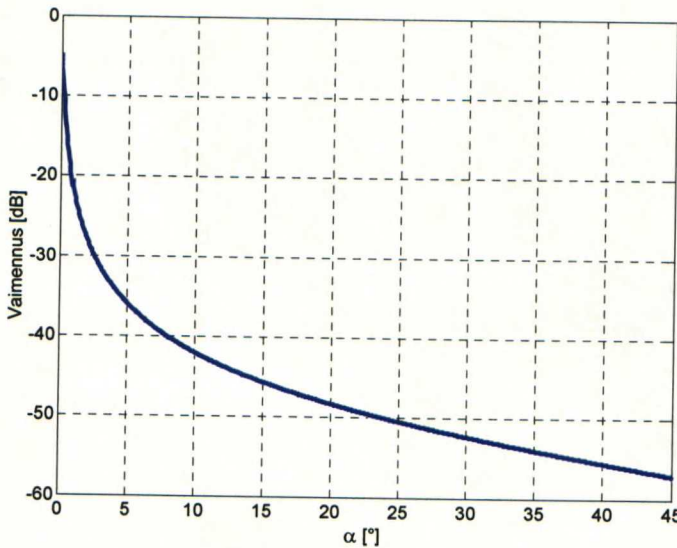
$$F(v) = \frac{1}{1-j} \int_v^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}u^2} du \quad (16)$$

$$F(v) \approx 0.452 \left[ \sqrt{(v-0.1)^2 + 1} - (v-0.1) \right] \quad (17)$$

Kuvassa 5 on taittumisen aiheuttama vaimennus esteen korkeuskulman  $\alpha$  mukaan, kun este on 2 km:n pituisen yhteysvälin puolivälissä ja taajuus on 2 GHz (kuva 4). Esteeksi on oletettu äärimmäisen ohut johtava taso, ns. veitsenterä. Kulma  $\alpha = 0^\circ$  vastaa tilannetta, jossa este yltää juuri ja juuri näköyhteysreitille. Vaimennuskäyrä on laskettu käyttäen approksimaatiota (17).



**Kuva 4.** Veitsenterädiffraktio yhteysreitillä olevan esteen yli.



**Kuva 5.** Taittumisen (veitsenterädiffraction) vaimennus kulman  $\alpha$  funktiona, kun este on yhteysvälin puolivälissä.

Todellinen este ei ole ideaalijohtava eikä äärettömän ohut. Pyöreäreunaisen esteen vaimennus on suurempi kuin terävän reunan, osa aallosta etenee esteen pinnalla pinta-aaltona ja vaimenee [2]. Ei-ideaalijohtavan kulman vaimennus on ideaalijohtavaa reunaa pienempi vaakapolarisaatiolla ja suurempi pystypolarisaatiolla [5]. Kiilan diffraktio voidaan laskea UTD:n (Uniform Theory of Diffraction) tai GTD:n

## 2. Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

(Geometrical Theory of Diffraction) avulla. UTD:llä tai GTD:llä voidaan laskea diffraktio myös häviöllisessä tapauksessa. Veitsenterädiffraktiolla saadaan kuitenkin kohtuullisen hyvä arvio pyöreiden ja huonommin johtavien esteiden diffraktiovaimennukselle, jos diffraktoitumiskulma on pieni.

Ideana UTD:ssa on käsitellä radioaaltoja säteinä ja laskea diffraktiolle sen aiheuttamaa kentänvoimakkuuden vaimenemista kuvaava ns. diffraktiokerroin. Esimerkiksi kiilalle diffraktiokerroin  $D$  on [5] [6]

$$D = D^{(1)} + D^{(2)} + R_0 D^{(3)} + R_n D^{(4)} \quad (18)$$

$$D^{(l)} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \cot \gamma^{(l)} F_0(2kLn \sin^2 \gamma^{(l)}) \quad (19)$$

$$F_0(X) = 2j\sqrt{X} e^{jX} \int_{\sqrt{X}}^{\infty} e^{-ju^2} du \quad (20)$$

missä

$R_0, R_n$  = kiilan sivujen heijastuskertoimet, kaavat (6) ja (7)

$k$  = aaltoluku

$L$  =  $s's/(s'+s)$

$n\pi$  = kiilan sivujen välinen kulma  $\phi$

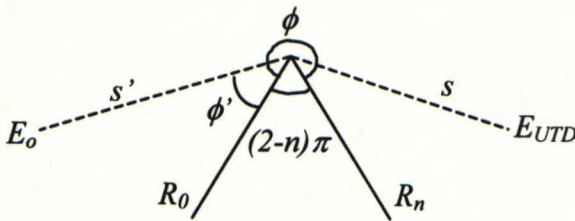
$\gamma^{(1)}$  =  $[\pi - (\phi - \phi')]/2n$

$\gamma^{(2)}$  =  $[\pi + (\phi - \phi')]/2n$

$\gamma^{(3)}$  =  $[\pi - (\phi + \phi')]/2n$

$\gamma^{(4)}$  =  $[\pi + (\phi + \phi')]/2n$

Kiilan geometria ja sitä kuvaavat parametrit on esitetty kuvassa 6.



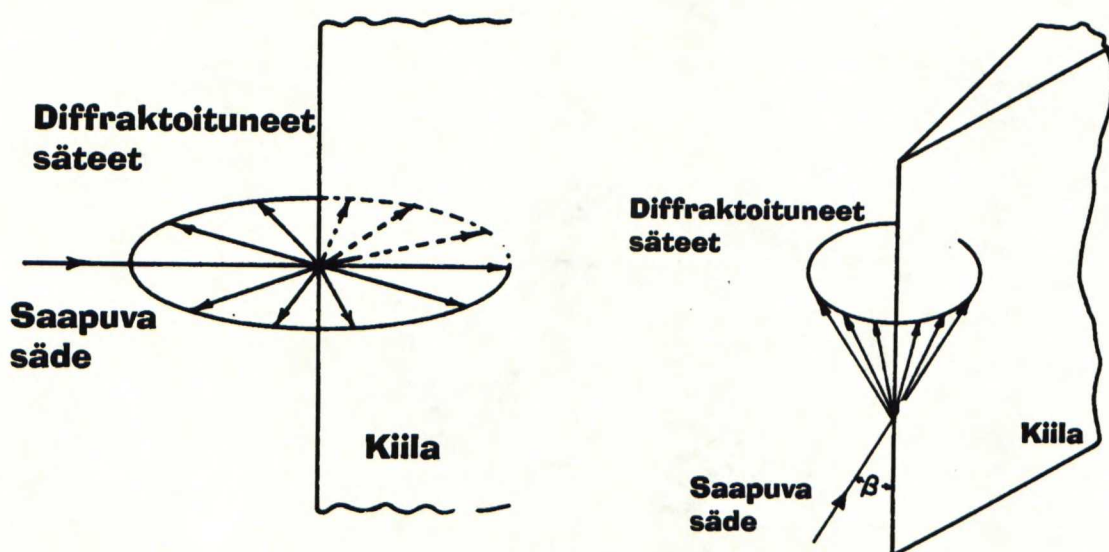
Kuva 6. Diffraktoivan kiilan geometria.

Kun diffraktiokerroin  $D$  on laskettu, saadaan diffraktoitunut kenttä  $E_{UTD}$

$$E_{UTD} = \frac{E_0 e^{-jk(s'+s)}}{s'+s} D \sqrt{\frac{s'+s}{s's}} \quad (21)$$

## 2. Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

Jos saapuva säde on kohtisuorassa diffraktoivan kiilan reunaan nähden, diffraktoituneet säteet ovat samassa tasossa. Sen sijaan jos säde kohtaa reunan viistosti, säteet diffraktoituvat kartiopinnan suuntiin; kartion leveys on kaksi kertaa säteen tulokulma  $\beta$  ja kartion akseli on diffraktoivat reunan suuntainen, kuva 7.



Kuva 7. Säteen diffraktoituminen kiilan reunasta.

### 2.4 Sirona

Sironnaksi kutsutaan heijastavan pinnan epätasaisuuden aiheuttamaa satunnaisenomaista heijastumista kaikkiin suuntiin (kuva 8) sekä pienten vapaiden kappaleiden, esimerkiksi vesipisaroiden tai ilmakehän molekyyliden, uudelleen lähettämää kenttää.



Kuva 8. Epätasaisen pinnan aiheuttama sirona.

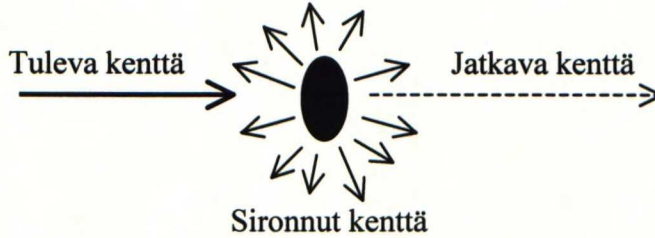
Heijastavasta pinnasta sironneen tehon määrä riippuu aallon tulokulmasta  $\gamma$  ja pinnan epätasaisuudesta. Jos pinnan korkeuden vaihtelut oletetaan normaalijakautuneiksi, sironnan aiheuttama lisävaimennus heijastuksessa täysin sileään pintaan verrattuna saadaan kaavalla (22).



$$\rho_s = e^{\left(\frac{\pi \sigma_h \sin \gamma}{\lambda}\right)^2} \quad (22)$$

missä  $\sigma_h$  on pinnan korkeuden keskihajonta pinnan keskikorkeuden suhteen. [4]

Pienten kappaleiden aiheuttama sironta syntyy, kun sirottava kappale lähettää osan etenevästä aallosta edelleen. Kappale toimii tällöin kuten antenni. Sen edelleenlähettämän kentän suunta ja vaihe on satunnainen verrattuna alkuperäiseen kenttään, eli kappale toimii sekundäärilähteenä, kuva 9.



**Kuva 9.** Pienen kappaleen sironta.

Suorilla yhteyksillä sironta aiheuttaa vaimennusta. Ilmakehävaimennus syntyy, kun osa tehosta siroaa ilmakehän molekyyleistä. Vastaavasti sade aiheuttaa sadevaimennusta sadepisaroiden aiheuttaman sironnan takia. Toisaalta monitieympäristössä sironta voi nostaa vastaanotettavan tehon tasoa, koska osa tehosta saapuu vastaanottimeen sirottavien pintojen ja kappaleiden kautta.

Yksinkertaisissa tapauksissa siroava teho voidaan laskea bistaattisen tutkayhtälön (23) avulla. Tällöin on tiedettävä sirottavan kappaleen etäisyys lähettimestä,  $r_{tx}$ , vastaanottimesta,  $r_{rx}$ , ja sirottavan kappaleen tutkapinta-ala,  $\sigma(\gamma)$ . Ainoastaan yksinkertaisimpien kappaleiden tutkapoikkipinta-ala on helposti laskettavissa, muulloin voidaan tutkapoikkipinta-ala yrittää ratkaista numeerisesti tai mittaamalla. [7]

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx} \lambda^2 \sigma(\gamma)}{(4\pi)^3 r_{tx}^2 r_{rx}^2} \quad (23)$$

### 2.5 Monitie-eteneminen kaupunkiympäristössä

Kaupunkiympäristölle on ominaista, että ympärillä on runsaasti korkeita rakennuksia ja heijastavia pintoja. Radioaallot heijastuvat, diffraktoituvat tai siroavat katuja ympäröivistä rakennuksista ja niiden nurkista risteäville kaduille, katon reunoista katukuiluun tai sieltä pois. Tällaisessa ympäristössä teho etenee useita erillisiä toisistaan riippumattomia reittejä pitkin lähettimeltä vastaanottimeen ns. monitie-etenemisenä (kuva 10).

Monitieympäristössä vastaanottimeen saapuu sama signaali useina kopioina eri viiveillä, eri vaiheisena ja eri määrän vaimentuneina. Tätä kuvataan radiokanavan impulssivasteella  $h(t)$

$$h(t) = \sum_i A_i e^{j\theta_i} \delta(t - \tau_i) \quad (24)$$

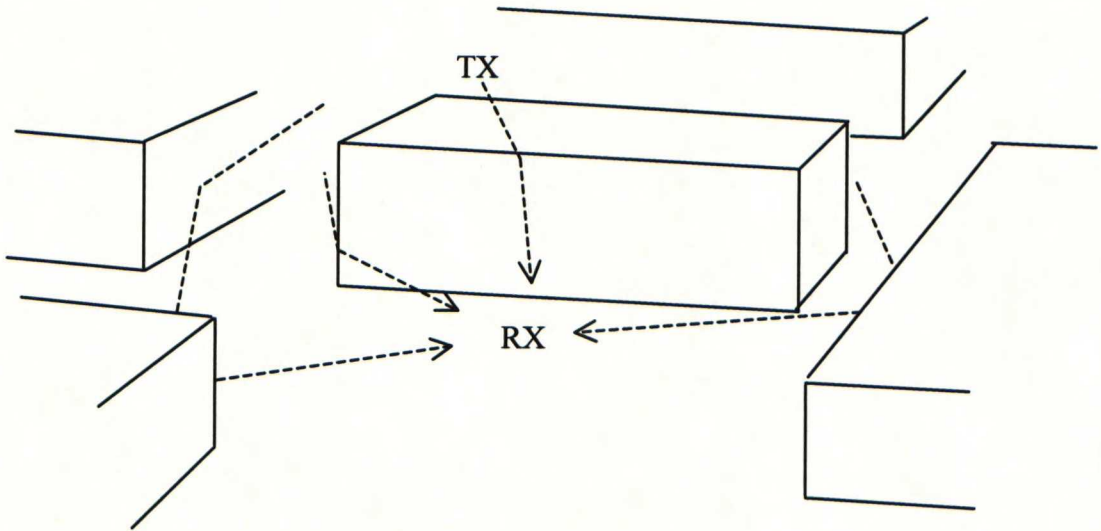
Kunkin reitin vaimennus  $A$  riippuu reitin pituudesta ja siihen lukeutuvista heijastuksista, diffraktioista ja sironnasta. Vastavasti vaihe  $\theta$  ja etenemisviive  $\tau$  riippuvat reitin pituudesta.

Vastaanotettava teho on kaikkien saapuvien signaalikomponenttien summa. Jos signaali vastaanotetaan kapeakaistaisena, eri signaalikomponentteja ei voida erottaa toisistaan ja ne summautuvat eri vaiheisina, ks. yhtälö (25). Tällöin vastaanotettava signaaliteho vaihtelee nopeasti paikan funktiona signaalireittien keskinäisten vaiheiden ja amplitudien mukaan. Tätä kutsutaan nopeaksi häipymäksi.

$$P_{rx} = \left| \sum h(t) \right|^2 \quad (25)$$

Jos vastaanotto on laajakaistaista, eri signaalikomponentit voidaan erottaa toisistaan. Signaalikomponenttien erottelukyky riippuu käytetystä symbolinopeudesta ja kaistanleveydestä. Vastaanotettava teho on silloin kaikkien signaalikomponenttien tehojen summa, ks. yhtälö (26).

$$P_{rx} = \sum |h(t)|^2 \quad (26)$$



**Kuva 10.** Monitie-eteneminen lähettimeltä TX vastaanottiin RX NLOS-ympäristössä.

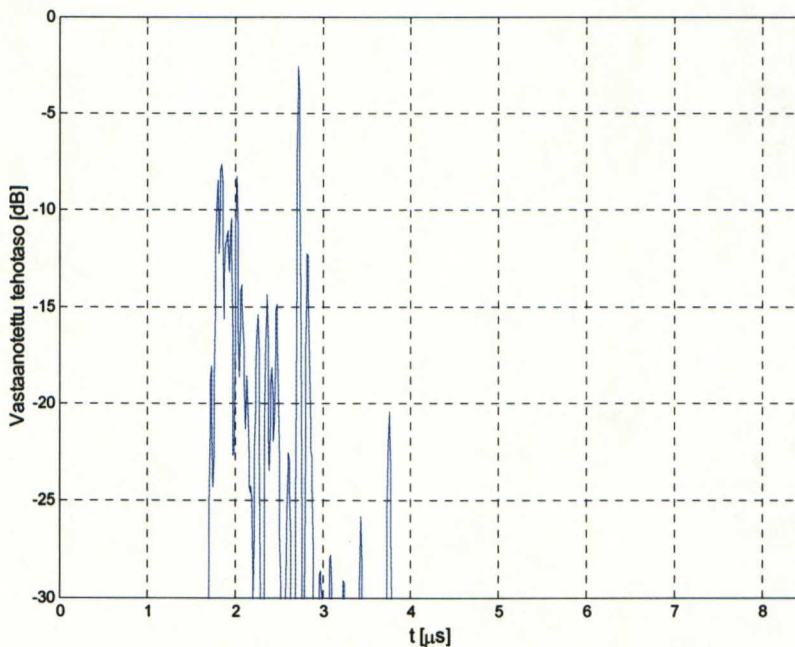
Jos lähettimen ja vastaanottimen välillä on näköyhteys (LOS, Line Of Sight), ensimmäisenä saapuva signaalikomponentti on edennyt vapaan tilan etenemisenä suoraan vastaanottiin ja on käytännössä aina myöhemmin saapuvia monitiekomponentteja voimakkaampi.



Useimmiten kaupunkiympäristössä näköyhteyttä antennien välillä ei kuitenkaan ole. Näköyhteydettömässä (NLOS, Non-Line Of Sight) ympäristössä ensin saapuva signaalikomponentti ei välttämättä ole voimakkain, vaan pääosa tehosta on jakautunut usean signaalikomponentin kesken. Esimerkki tällaisessa ympäristössä mitatusta impulssivasteesta on kuvassa 11. Se on mitattu Helsingin keskustassa Läntisellä Teatterikadulla lähettimen ollessa kauppakeskus Kaisan parkkihallin katolla. Mittaus suoritettiin IDC:n kanavaluotaimella, ks. kohta 5.1.

Yksi tapa luokitella monitiekomponentteja on rajata ne eri luokkiin etenemisreittien perusteella. Esimerkiksi yhteen luokkaan luetaan aallot, jotka etenevät rakennusten yläpuolella vapaan tilan etenemisenä ja diffraktoituvat vastaanottopäätä reunustavien rakennusten kattojen reunoista katukuiluun ja päätyvät siten vastaanottimeen. Toiseen luokkaan luetaan aallot, joissa päämekanismi on edetä pitkin katuja heijastumalla ympäröivien rakennuksien seinistä ja diffraktoitumalla niiden nurkista muille kaduille.

Nämä kaksi luokkaa eivät vielä riitä luokittelemaan kaikkia reittejä. LOS-komponenttia voidaan pitää tai olla pitämättä katukuilussa edenneenä. Lisäksi on useita reittejä, jotka eivät varsinaisesti lukeudu kumpaankaan luokkaan tai lukeutuvat osittain kumpaankin.



**Kuva 11.** NLOS-ympäristössä mitattu impulssivaste.

Useat etenemismallit lähtevät kuitenkin oletuksesta, että valtaosa tehosta etenee käyttäen jompaakumpaa edellä mainittua mekanismia. Bernissä tehtyjen mittausten ja simulaatioiden perusteella tukiaseman ollessa kattotason alapuolella noin 100 m etäisyydelle tukiasemasta katukuilussa eteneminen on ratkaisevaa ja yli 300 m etäisyyksillä tukiasemasta kattojen yli edennyt teho alkaa olla merkittävää [8]. Münchenissä tehdyssä vastaavassa kokeessa havaittiin katukuiluetenemisen olevan tärkein mekanismi alle 600 m etäisyyksillä ja kattojen yli etenemisen yli 1.1-1.2 km etäisyyksillä. Välimaastossa luotettavia simulointituloksia saatiin vain täydellä kolmiulotteisella laskennalla, muualla riitti laskea yksi kaksiulotteinen taso [9].



## 2. Radioaaltojen eteneminen kaupunkiympäristössä

Kummassakin mittauksessa suuntaus on selvä. Etäisyyden kasvaessa kattojen yläpuolella edenneen tehon osuus vastaanotetusta tehosta nousee.

Ongelmalliseksi monitie-ympäristön tekee se, että eri signaalireittien ja vastaanotettavan tehon analyyttinen ratkaiseminen on hankalaa. Vastaanotettavan tehon ennustamiseksi onkin laadittu useita sekä stokastisia että deterministisiä etenemismalleja.

## 3 Etenemismallit kaupunkiympäristössä

On olemassa useita erityyppisiä malleja vastaanotettavan etenemisvaimennuksen tai muiden radiokanavan ominaisuuksien ennustamiseksi. Malleissa on eroa niin lähtökohdissa, laskentatekniikassa kuin saatavissa lopputuloksissakin. Yksinkertaisimmat mallit soveltuvat solujen karkeaan mallintamiseen nopeasti, monimutkaisimmilla voidaan taas tutkia tarkemmin ympäristön vaikutusta ja paikallisia ilmiöitä.

Yksinkertaisimmat mallit pyrkivät ennustamaan ainoastaan etenemisvaimennuksen empiirisiin mittaustuloksiin sovitettujen käyrien avulla, joita tarpeen mukaan korjataan sopivilla yksinkertaisilla ympäristöä kuvaavilla parametreilla. Esimerkiksi COST231-Hata-malli (European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research, action 231) käyttää parametreina lähetystaajuutta, etäisyyttä ja antennien korkeuksia maanpinnasta.

Hieman monimutkaisemmat, ns. semideterministiset, mallit perustuvat empiiristen mittausten lisäksi teoreettisiin laskemiin tai niiden pohjalta tehtyihin tilastoihin. Lisäämällä malliin teoreettista näkökulmaa, voidaan lähiympäristön paikallista vaikutusta huomioida paremmin. Semideterministiset mallit vaativatkin usein useampia ympäristöä kuvaavia parametreja ja ennuste on laskettava uudestaan ympäristön muuttuessa. Tunnettu semideterministinen malli COST231-Walfisch-Ikegami (ks. kohta 3.1) käyttää COST231-Hata-malliin nähden lisäparametreina rakennusten korkeutta, kadun leveyttä, korttelien kokoa ja kadun suuntaa. [10]

Täysin deterministiset mallit saattavat pyrkiä ennustamaan kaikkia radiokanavan ominaisuuksia, signaalireittien viiveet, suunnat ja polarisaatio mukaan lukien. Nämä mallit vaativat kuitenkin tarkan topografiakartan ympäristöstä ja ovat huomattavasti raskaampia laskea kuin yksinkertaisemmat mallit. Laskennan keventämiseksi eteneminen lasketaan usein ainoastaan kaksiulotteisesti vaakatasossa tai vaihtoehtoisesti vaakatasossa sekä lähettimen ja vastaanottimen välisessä pystytasossa.

Osa malleista, etenkin vanhemmat, keskittyvät ennustamaan etenemishäviötä makrosolu ympäristössä. Nykyisin solukoko on kokonaiskapasiteetin kasvattamiseksi pienenemään päin tiheästi asutuilla alueilla. Mikrosoluissa ja pienemmissä makrosoluissa tukiaseman erilaisen sijoittelun ja läheisyyden takia suuriin makrosoluihin suunnitellut mallit eivät toimi. Taulukossa 1 on esitetty radioverkkojen solujen luokittelu [10].



**Taulukko 1.** Solujen luokittelu.

Solutyyppi	Solun säde	Tukiaseman sijainti
iso makrosolu	1 – 30 km	Ulkona, rakennusten keskimääräisen korkeuden ja ympäröivien rakennusten kattotason yläpuolella.
pieni makrosolu	0.5 – 3 km	Ulkona, rakennusten keskimääräisen korkeuden yläpuolella. Osa ympäröivistä rakennuksista on korkeampia kuin tukiasemakorkeus.
mikrosolu	alle 1 km	Ulkona, rakennusten keskimääräisen korkeuden alapuolella.
pikosolu	alle 500 m	Ulkona tai sisällä, kattotason alapuolella.

### 3.1 COST231-Walfisch-Ikegami

COST231:n ehdottama Ikegami- ja Walfisch-mallien yhdistelmä (COST231-WI) on sekä empiirisiin mittauksiin että teoreettisiin laskelmiin perustuva etenemismalli, joka ennustaa etenemisvaimennusta mikro- ja makrosoluympäristöissä. Keskeisenä erona etenemismalleista ehkä eniten käytettyyn COST231-Hata-malliin on parametrien suurempi määrä, jolloin ympäristö saadaan kuvattua hieman paremmin ja siten vaimennus arvioitua tarkemmin. Lisäksi COST231-Hata soveltuu ainoastaan makrosolujen suunnitteluun. Mikrosoluissa, joiden säde on alle 1 km, se ei ole pätevä [10].

COST231-WI-mallissa on erilliset kaavat LOS- ja NLOS-tilanteiden laskemiseen. LOS-tilanteessa laskemiseen riittää yksi selkeä kaava, modifioitu versio vapaan tilan vaimennuksesta. NLOS:ssa lasketaan erikseen eri mekanismien aiheuttamat vaimennukset: vapaan tilan vaimennus, moninkertaisten heijastusten vaimennus, vaimennus katolta kadulle ja sirontavaimennus. Malli olettaa, että teho tulee joko suoraan antennista tai kattojen yli etenemällä. Katuja pitkin ohjautunutta tehoa ei oteta huomioon.

COST231-WI:n käyttämät parametrit on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** COST231-WI:n parametrit.

Symboli	Suure	Pätevyysalue	Yksikkö
$d$	Vastaanottimen ja lähettimen välinen etäisyys	0.02-5	km
$f$	Taajuus	800-2000	MHz
$h_{Roof}$	Rakennusten korkeus		m
$h_{Base}$	Tukiaseman korkeus	4-50	m
$h_{Mobile}$	Vastaanottimen korkeus	1-3	m
$w$	Katujen leveys		m
$b$	Korttelien leveys		m
$\phi$	Kadun suunnan ja tukiaseman suunnan välinen kulma		aste



### 3. Etenemismallit kaupunkiympäristössä

LOS-tilanteessa etenemisvaimennus on laskettavissa kaavasta (27)

$$PL = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad [\text{dB}] \quad (27)$$

NLOS-tilanteessa etenemisvaimennus lasketaan kaavoista (28)-(36)

$$PL = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{jos } L_{rts} + L_{msd} > 0 \quad [\text{dB}] \quad (28)$$

$$PL = L_0 \quad \text{jos } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \quad [\text{dB}]$$

Kaavasssa (28)  $L_0$  vastaa vapaan tilan vaimennusta,  $L_{rts}$  katon reunalta kadulle diffraktoitumisen sekä sironnan vaikutusta vaimennukseen ja  $L_{msd}$  moninkertaisten diffraktioiden vaikutusta vaimennukseen.

$$L_0 = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (29)$$

$L_{rts}$  (30) huomioi kadun leveyden ja suunnan tukiasemaan nähden. Kadun suunnan huomioiva termi,  $L_{Ori}$  (31), on määritetty empiirisesti vain muutaman mittauksen avulla.

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h_{Roof} - h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (30)$$

$$L_{Ori} = -10 + 0.354\varphi \quad \text{jos } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \quad (31)$$

$$L_{Ori} = 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \quad \text{jos } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ$$

$$L_{Ori} = 4.0 - 0.114(\varphi - 55) \quad \text{jos } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ$$

Moninkertaisten diffraktioiden vaimennus  $L_{msd}$  perustuu Walfischin ja Bertontin likimääräiseen ratkaisuun kattotasoa korkeammille tukiasemille ja se on laajennettu pätemään myös kattotason alapuolella oleville tukiasemille mittauksiin perustuvilla empiirisillä apufunktioilla.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (32)$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + h_{Base} - h_{Roof}) \quad \text{jos } h_{Base} > h_{Roof} \quad (33)$$

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{jos } h_{Base} \leq h_{Roof}$$

$$k_a = 54 \quad \text{jos } h_{Base} > h_{Roof} \quad (34)$$

$$k_a = 54 - 0.8(h_{Base} - h_{Roof}) \quad \text{jos } d \geq 0.5 \text{ km ja } h_{Base} \leq h_{Roof}$$

$$k_a = 54 - 1.6(h_{Base} - h_{Roof})d \quad \text{jos } d < 0.5 \text{ km ja } h_{Base} \leq h_{Roof}$$

$$k_d = 18 \quad \text{jos } h_{Base} > h_{Roof} \quad (35)$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{h_{Roof}} \quad \text{jos } h_{Base} \leq h_{Roof}$$

$$\begin{aligned} k_f &= -4 + 0.7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) && \text{keskikokoisille kaupungeille ja urbaanille seudulle} \quad (36) \\ k_f &= -4 && \text{keskustoille, joissa on puustoa on jonkin verran} \\ k_f &= -4 + 1.5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) && \text{suurille keskustoille} \end{aligned}$$

COST231-Hata-malliin verrattuna COST231-WI on työläämpi käyttää, koska vaaditut lisäparametrit voivat muuttua usein ja paljon lyhyelläkin matkalla. COST231-WI-mallin antamat arviot ovat kohtuullisen tarkkoja, kun tukiasema on kattojen yläpuolella. Keskivirhe on alle 3 dB ja hajonta 4-8 dB. Tarkkuus kuitenkin laskee tukiaseman korkeuden lähestyessä kattotasoa, ja paljon sen alapuolella tarkkuus on heikko [10].

Julkistamisen jälkeen COST231-WI-mallista on löydetty virhe katonreunasta katukuiluun diffraktion laskemisessa. Virheellinen versio ennustaa 8.7 dB liian suuren etenemisvaimennuksen [11]. Tässä työssä käytetään korjattua versiota.

## 3.2 Har-Xia-Bertoni

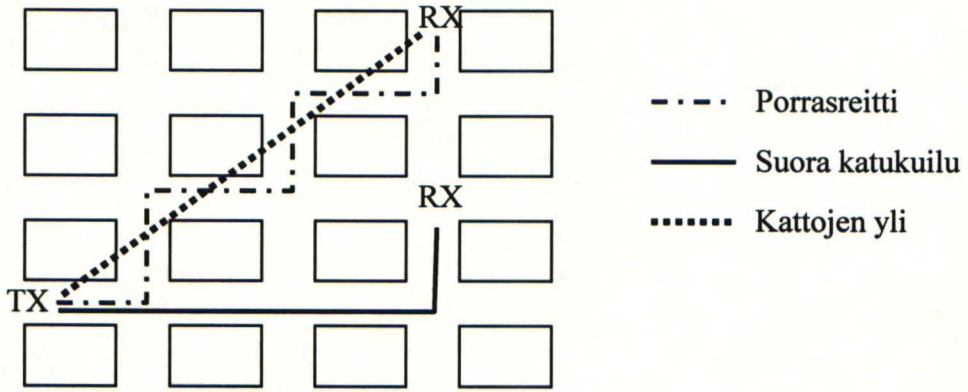
Yksi lähestymistapa etenemismalleissa on eräänlainen kompromissi kaksi- ja kolmiulotteisesta mallista. Näissä kvasi-3D-malleissa lasketaan tai arvioidaan erikseen eteneminen sekä kaksiulotteisesti vaakatasossa että tukiaseman ja liikkuvan pään välisessä pystytasossa. Lähtöoletuksena on, että kattojen yli ei tule merkittävässä määrin tehoa muualta kuin antennien välisen pystytason suunnalta. Laskemalla eteneminen ainoastaan kahdessa kohtisuorassa tasossa saadaan laskentaa kevennettyä huomattavasti verrattuna täyteen 3D-mallinnukseen.

Laskemalla säteenseurannalla (ks. kohta 3.3) kummatkin tasot erikseen ja yhdistämällä lopputulokset päästään huomattavasti tarkempaan arvioon kuin COST231-WI-mallilla [8]. Kvasi-3D-malli toimii lisäksi hyvin myös kattotason alapuolella oleville tukiasemakorkeuksille.

Har-Xia-Bertoni-mallia [12] voidaan pitää kvasi-3D-mallina. Vaikka malli perustuu empiirisiin mittauksiin, se pyrkii ennustamaan etenemisvaimennuksen erikseen reiteille kattojen yli, risteyksistä sivukatujen kautta eteneville ns. porrasreiteille ja suorinta katukuilua pitkin etenevälle teholle. Se siis erittelee etenemismekanismeja kuten deterministiset kvasi-3D-mallit. Tarkoitus on ollut luoda mahdollisimman yksinkertaiset laskentakaavat, jotka ovat päteviä erityisesti, kun lähetinantenni on kattotason alapuolella. Kuva 12 selventää mallin erittelemiä reittejä.

Har-Xia-Bertoni-malli sisältää erilliset kaavat LOS-reiteille, NLOS-reiteille matalasti rakennetulla kaupunkialueella (alle 4 kerrosta) ja NLOS-reiteille korkeasti rakennetulla kaupunkialueella.





Kuva 12. Har-Xia-Bertoni-mallin erittelemät etenemisreitit.

Jos lähettimen ja vastaanottimen välillä on näköyhteys (LOS), käytetään vastaanotetun tehon ennustamiseen kaavaa (38), jos  $R < R_{bk}$  tai kaavaa (39), jos  $R > R_{bk}$ .  $R_{bk}$  on etäisyys, jonka jälkeen katukuilussa etenevän aallon vaimennuksen eksponentti muuttuu. Eksponentti muuttuu, koska pidemmillä etäisyyksillä maanpinta alkaa peittää 1. Fresnelin vyöhykettä [13]. Murtopisteen  $R_{bk}$  etäisyys kilometreinä on määritelty kaavassa (37).

$$R_{bk} = \frac{4h_b h_m}{1000\lambda} \quad (37)$$

$$PL = 81.14 + 39.40 \log(f) - 0.09 \log(h_b) + [15.80 - 5.73 \log(h_b)] \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (38)$$

$$PL = [48.38 - 32.10 \log(R)] + 45.70 \log(f) + (25.34 - 13.90 \log R_{bk}) \log h_b + (32.10 + 13.90 \log h_b) \log R + 20 \log(1.6 / h_m) \quad [\text{dB}] \quad (39)$$

Kaikki matalan kaupunkialueen NLOS-reittien etenemishäviöt on yhdistetty yhdeksi kaavaksi (40). Niiden laskentakaavat olivat riittävän samankaltaiset, jotta ne pystyttiin yhdistämään. Kaavat on saatavissa myös erillisinä, jos eri mekanismeja on tarvetta vertailla [12].

$$PL = [139.01 + 42.59 \log f] - [14.97 + 4.99 \log f] \text{sgn}(\Delta h) \log(1 + |\Delta h|) + [40.67 - 4.57 \text{sgn}(\Delta h) \log(1 + |\Delta h|)] \log R + 20 \log \frac{\Delta h_m}{7.8} + 10 \log \frac{20}{r_h} \quad [\text{dB}] \quad (40)$$

Alla esiteltävissä korkean kaupunkialueen kaavoissa kattojen yli menevä reitin ja porrasreittiä etenevän reitin etenemishäviöt on yhdistetty yhdeksi kaavaksi (41). Katuja pitkin etenevän tehon etenemisvaimennus on laskettavissa kaavasta (42)

$$PL = 143.21 + 29.74 \log(f) - 0.99 \log(h_b) + [47.23 + 3.72 \log(h_b)] \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (41)$$

$$PL = 135.41 + 12.49 \log(f) - 4.99 \log(h_b) + [46.84 - 2.34 \log(h_b)] \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (42)$$



Ideana Har-Xia-Bertoni-mallin erillisillä kaavoilla eri mekanismeille on käyttää katuja pitkin etenevän tehon kaavaa, kun vastaanotin on ensimmäisellä poikittaisella tai rinnakkaisella sivutiellä ja kauempana kattojen yli edenneen tehon ja porrasreittein yhdistelmäkaavaa.

Tarvittaessa kattojen yli edenneen ja porrasreittein yhdistelmäkaava voidaan jakaa erilleen. Erilliset kaavat kattojen yli edenneelle teholle (43) ja porrasreittiä edenneelle teholle (44) korkeasti rakennetulla kaupunkialueella ovat

$$PL = 144.99 + 19.59 \log(f) - 0.66 \log(h_b) + [44.49 + 3.52 \log(h_b)] \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (43)$$

$$PL = 141.40 + 39.88 \log(f) - 1.33 \log(h_b) + [49.97 + 3.92 \log(h_b)] \log(R) \quad [\text{dB}] \quad (44)$$

Kaavoissa käytetyt parametrit, pätevyysalueet ja yksiköt on määritelty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Har-Xia-Bertoni-mallin käyttämät parametrit.

Symboli	Suure	Pätevyysalue	Yksikkö
$R$	Vastaanottimen ja lähettimen välinen etäisyys	0.05-3	km
$f$	Taajuus	0.9-2	GHz
$h_b$	Tukiaseman korkeus maanpinnasta		m
$h_m$	Vastaanottimen korkeus maanpinnasta		m
$r_h$	Vastaanottimen ja lähimmän katonreunan välinen etäisyys		m
$R_{bk}$	Murtopisteen etäisyys		km
$\Delta h$	Tukiaseman ja keskimääräisen kattotason välinen korkeusero	$-8 < \Delta h < 6$	m
$\Delta h_m$	Vastaanottimen ja lähimmän katonreunan välinen korkeusero		m

### 3.3 Säteenseuranta

Deterministisiä menetelmiä radiokanavan mallintamiseen ovat säteenseuranta (ray tracing) ja FDTD (Finite Difference Time Domain) [14]. Lisäksi FEM:iä (Finite Element Method) käytetään pienempien kokonaisuuksien tai erikoistilanteiden analysoinnissa [15]. Näistä jälkimmäiset pohjautuvat suoraan sähkömagnetiikkaan ja käsiteltävän alueen jakamiseen pieniin erikseen laskettaviin soluihin. Sen sijaan säteenseuranta perustuu ns. geometriseen optiikkaan, jossa aallonpituus on oletettu äärettömän pieneksi ja radioaallon oletetaan etenevän kuten valo. [16]

Menetelmistä säteenseurantaa käytetään eniten suurten tilojen mallintamiseen. Se on laskennallisesti muita kevyempi, eikä siinä tarvitse ratkaista vastaanotettavaa kenttää koko käsiteltävässä avaruudessa. Riittää, että löydetään tiettyyn käsiteltävään pisteeseen päätyvät etenemisreitit.

Säteenseurannassa lähetinantennista lähteviä radioaaltoja seurataan säteinä, kunnes ne ovat läpikäyneet tietyn määrän heijastuksia tai diffraktioita tai ne ovat vaimetuneet



liikaa. Kultakin reitiltä vastaanotettu teho saadaan laskettua edetyn matkan sekä kohdattujen heijastus- ja diffraktiokertoimien avulla. Mahdollisesti myös sironta seinistä huomioidaan, jos sirottavasta pinnasta on esteetön yhteys vastaanottimeen [17]. Etenemisviive saadaan suoraan reitin pituudesta. [18]

Heijastuskertoimet saadaan laskettua helposti, kunhan heijastavien pintojen sähköiset ominaisuudet tunnetaan. Jos pintojen ominaisuuksia ei tunneta, voidaan heijastuskertoimeksi valita jokin tyypillinen arvo, jota käytetään kaikille pinnoille ja tulokulmille [17]. Diffraktio sen sijaan pitää huomioida erikseen jonkin tarkoitukseen sopivan diffraktioteorian avulla. Yksinkertaisimmillaan diffraktiokerroin voidaan laskea olettamalla kaikki diffraktiot veitsenterädiffraktioiksi. Tarkemmin diffraktio voidaan käsitellä esimerkiksi UTD:n tai GTD:n avulla [5].

Sironnan ja diffraktion huomioiminen nostaa laskentataakkaa säteenseurannassa huomattavasti. Kukin diffraktio tai sirottava kappale toimii erillisenä sekundäärilähteenä, joka lähettää radioaaltoja melkein kaikkiin suuntiin. Sallittu määrä diffraktioita tai sirontaa kullakin reitillä on usein rajattu hyvin pieneksi. Myös läpikäytävien heijastusten määrä voi olla rajattu, tai reitti hylätään, kun sen teho on laskenut tietyn rajan alle. Näillä parametreilla voidaan vaikuttaa simulointiin kuluvaan aikaan, mutta samalla lopputuloksen epävarmuus kasvaa.

Suuren laskentatehon lisäksi säteenseurannan ongelma on vaadittu tarkka topografiakartta laskettavasta alueesta. Täysin tarkan mallin tekeminen kaupunkiympäristöstä on mahdotonta jo senkin takia että mikroaaltoalueella aallonpituuden luokkaa olevien yksityiskohtien määrä kasvaa suureksi ja lisäksi osa ympäristöstä muuttuu jatkuvasti. Autot ja ihmiset liikkuvat, ja vuodenajat sekä sää muuttavat olosuhteita. Usein tyydytäänkin varsin yksinkertaistettuun malliin analysoitavasta ympäristöstä, ulkotilassa talot on kuvattu laatikoilla, maanpinnan muoto määritellään vain karkeasti ja pintojen karheus sekä sähköiset ominaisuudet arvioidaan. Jos valmista mallia ympäristöstä ei ole olemassa, se voidaan rakentaa stereoskooppisten ilmakuvausten perusteella [17]. Nykyisillä korkeatarkkuuksisilla ilmakuvilla päästään korkeussuunnassa hyvin tarkkaan malliin, virhe on vain noin 15 cm. Lisäksi kuvista voidaan erottaa katon muoto [19]. Sisätiloissa malli on tehtävissä esimerkiksi talon pohjapiirroksista.

Ympäristön mallin tarkkuuden, seinien sähköisten ominaisuuksien sekä heijastusten ja diffraktioiden maksimimäärän vaikutusta saatavien tulosten tarkkuuteen on tutkittu vertaamalla säteenseurannalla laskettuja tuloksia mitattuihin [20]. Tutkimuksessa käytetty säteenseuranta huomioi maaheijastuksen, seinäheijastukset ja nurkkadiffraktiot. Rakennukset oli oletettu äärettömän korkeiksi, mutta laskenta itsessään tapahtui kolmessa ulottuvuudessa. Kaikkien seinien materiaalit oletettiin samanlaisiksi. Säte sai reitillä käydä läpi korkeintaan seitsemän heijastusta ja yhden diffraktion. Suuremman määrän heijastuksia ja diffraktioita ei havaittu juuri parantavan tuloksia. Tulosten perusteella keskimääräisen tehon arviointiin säteenseurannalla mikrosolussa riittää 1 m tarkkuus rakennustietokannassa. Parhaiten seinämateriaalia kuvasi johtavuus  $\sigma = 0.005 \text{ S/m}$  ja suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_r = 5$ . Jos virhe tietokannassa ylitti metrin, kasvoi virhe ennustetussa etenemisvaimennuksessa huomattavasti.

Täydestä 3-ulotteisesta simulaatiosta saadaan tietenkin tarkin tulos, mutta laskenta-ajan lyhentämiseksi voidaan ulottuvuuksia karsia. Usein laskenta tehdään ainoastaan

kahdessa ulottuvuudessa vaakatasossa, eli huomioidaan pelkkä katukuilu-eteneminen [16]. Lisäksi maaheijastus huomioidaan erikoistapauksena. Tarkkuutta voidaan parantaa ottamalla lähettimen ja vastaanottimen välinen pystytaso toisena 2-ulotteisena leikkauksena, jolloin myös suoraan kattojen yli tullut teho huomioidaan [8]. Tällöin puhutaan ns. kvasi-3D-laskennasta.

Lähellä tukiasemaa, erityisesti jos tukiasema on kattotason alapuolella, vaakatasossa laskettu kaksiulotteinen säteenseuranta riittää hyvin ennustamaan vastaanotetun tehon. Siirryttäessä kauemmas alkaa kattojen yli edenneen tehon merkitys kasvaa. Kaukana tukiasemasta riittää pelkkä vastaanottimen ja lähettimen välisen pystytason laskeminen, jos ympäröivät talot ovat suunnilleen saman korkuisia. Jos talojen korkeudet vaihtelevat paljon ja joukossa on korkeita taloja, saadaan luotettava arvio vastaanotettavalle teholle vain täydellä 3-ulotteisella säteenseurannalla. [21]



## 4 Etenemismekanismit ja niiden tunnistaminen

Karkealla tasolla etenemismekanismit kaupunkiympäristössä voidaan jakaa kolmeen päämekanismiin: näköyhteys, katukuiluja pitkin eteneminen ja kattojen yli eteneminen. Näistä kaksi jälkimmäistä voivat sisältää useita heijastuksia ja diffraktioita sekä sirontaa reitillä lähetysantennista vastaanottoantenniin.

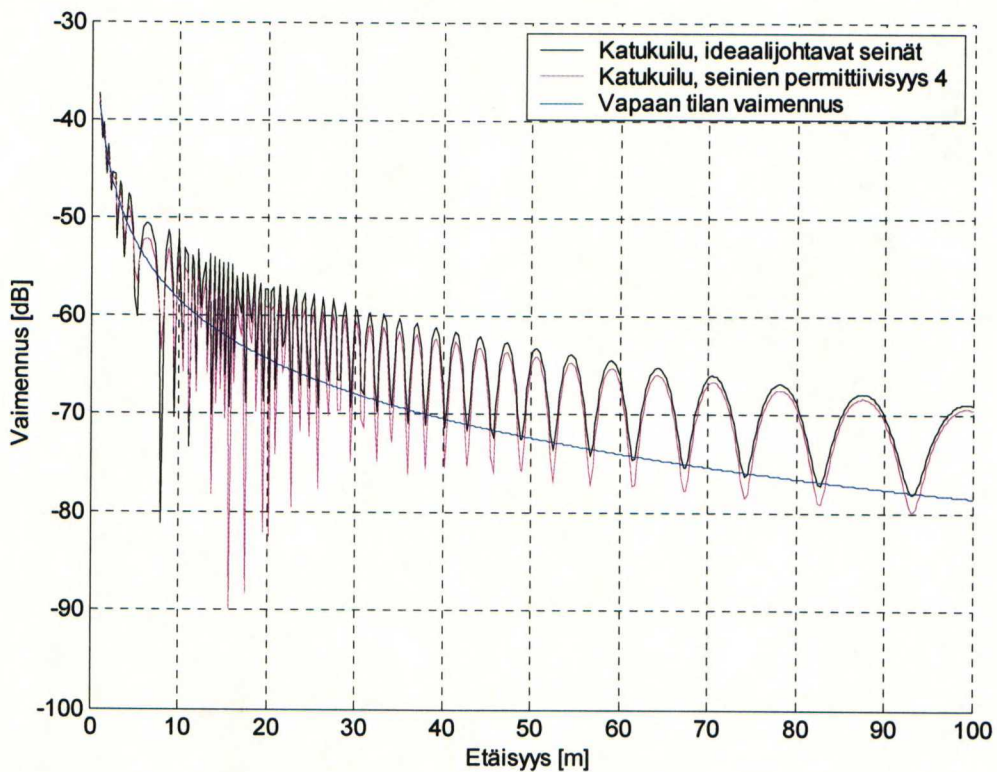
Vastaanotossa tunnetaan ainoastaan vastaanotettu teho tai amplitudi, vaihe, etenemisviive, tulosuunta ja polarisaatio. Ne eivät vielä sinällään kerro, miten aalto on edennyt. Niiden perusteella voidaan kuitenkin tehdä oletuksia aallon kulkemasta reitistä. Tarkoitus on saada määriteltyä niin tarkat kriteerit eri etenemismekanismeille, että vastaanotetut signaalit saadaan luokiteltua kohtuullisella varmuudella.

### 4.1 Katukuilussa eteneminen

Tiiviisti rakennetulla kaupunkialueella katuja ympäröivät molemmin puolin korkeat kerrostalot. Kun ajatellaan rakenteen poikkileikkausta, se muistuttaa kuilua, jonka pohjan muodostaa katu itse ja reunat katua reunustavat rakennukset. Risteävät kadut muodostavat omat kuilunsa ja koko tiiviisti rakennettua aluetta voidaan käsitellä katukuiluverkostona. Radiolähettimen ollessa tuntuvasti kattotason alapuolella, osa tehosta nousee pois katukuilusta, mutta osa etenee pitkin katukuilua ja katukuiluverkostoa.

Sädeteorian mukaisesti voidaan ajatella, että katukuilussa etenevä radioaalto heijastelee katua reunustavista seinistä puolelta toiselle. Vaihtoehtoisesti katua voidaan ajatella huomattavasti aallonpituutta suurempana aaltojohtona, jossa aalto etenee. Katua reunustavien talojen seinät kuitenkin ovat kaikkea muuta kuin hyvin sähköä johtavia, joten häviöt ovat suuria. Kaikista heijastuksista tulee tuntuva lisävaimennus ja osa aallosta läpäisee seinän. Koska katukuilu ohjaa aaltoa, se ei pääse leviämään pallopintana kuten vapaassa tilassa. Tästä syystä etenemisvaimennus katukuilussa voi olla pienempi kuin vapaan tilan vaimennus.

Sädeteoriassa radioaallon ohjautumista kuvaavat maa- ja seinäheijastukset. Kuvaan 13 on laskettu etenemisvaimennus katukuilussa etäisyyden funktiona. Laskuissa ainoastaan kerran seinästä heijastuneet säteet on huomioitu. Vertailukohtana on pelkkä vapaan tilan vaimennus. Etenemisvaimennus on laskettu sekä ideaalijohtaville seinille että sähköä johtamattomille seinille, joiden  $\epsilon_r = 4$ . Laskuissa antennit ovat olleet keskellä 10 m leveää katua ja käytetty taajuus on ollut 2 GHz. Maaheijastus on jätetty huomiotta.



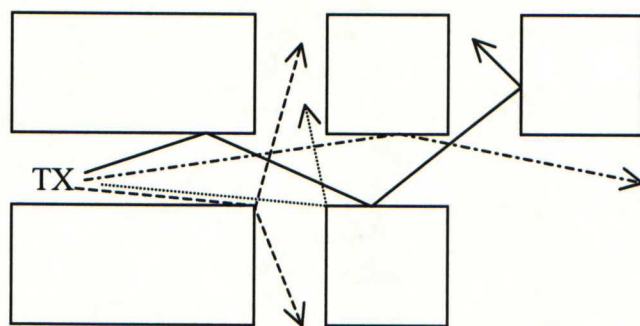
**Kuva 13.** Etenemisvaimennus katukuilussa.

Kuvasta 13 havaitaan vastaanotettavan tehon katukuilussa olevan selkeästi suurempi kuin vapaassa tilassa edenneen aallon. Tämä on selvää, koska vastaanottoon saapuu useita säteitä yhden sijaan. Lisäksi kuvasta käy hyvin ilmi monitie-etenemisen aiheuttamat häipymät. Jos maaheijastus ja useammat seinäheijastukset huomioitaisiin, olisi häipymiä huomattavasti enemmän ja ne olisivat syvempiä.

Kun vastaanotin on riittävän kaukana lähettimestä, alkavat maanpinta ja reunustavat seinät peittää 1. Fresnelin vyöhykettä. Tämä aiheuttaa lisävaimennusta näköyhteysreittiin. Murrosetäisyyttä  $R_{bk}$  lähempänä vaimennus on karkeasti ottaen kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön ja kauempana kääntäen verrannollinen etäisyyden kolmanteen tai neljänteen potenssiin [13].  $R_{bk}$  on määritelty kaavassa (37).

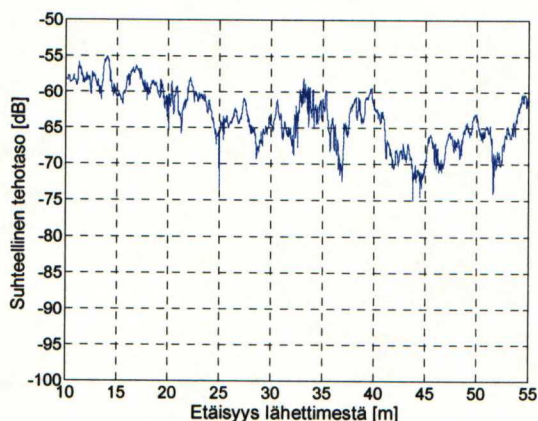
Risteyksissä osa aallon energiasta diffraktoituu talojen nurkista tai heijastuu risteävälle kadulle. Vastaanotettava teho on noin 20-25 dB heikompi nurkan takana risteävällä kadulla [22], eli valtaosa tehosta jatkaa risteyksestä suoraan. Nurkkadiffraktioiden ansiosta radioaallot kuitenkin etenevät risteäviä ja rinnakkaisia katuja pitkin useidenkin kortteleiden päähän katukuilu-etenemisenä. Heijastuminen ja taittuminen katukuilussa ja risteyksissä on esitetty kuvassa 14.



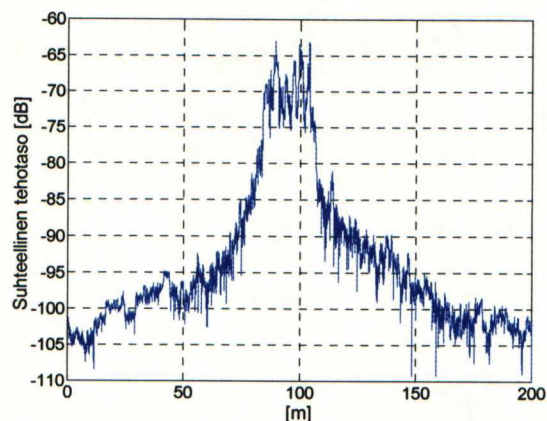


**Kuva 14.** Heijastuminen ja diffraktio seinistä ja nurkista katukuiluissa.

Kuvassa 15 on esitetty vastaanotettu suhteellinen tehotaso näköyhteysreitillä, kun on liikuttu pois päin lähettimestä ja kun sama näköyhteysreitti on ylitetty poikittaista katua pitkin 250 m:n päässä lähettimestä.



(a)



(b)

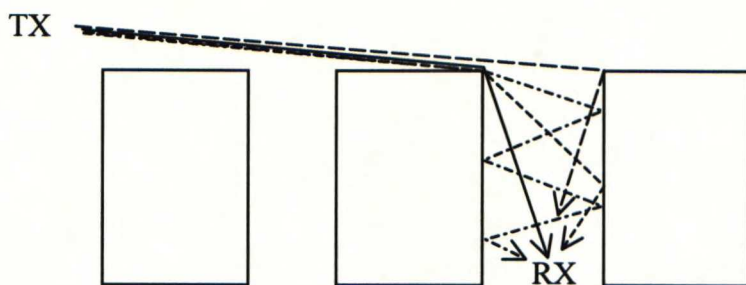
**Kuva 15.** Vastaanotettu suhteellinen tehotaso katukuilussa (a) näköyhteysreitillä ja (b) poikittaisella kadulla.

## 4.2 Kattojen yli eteneminen

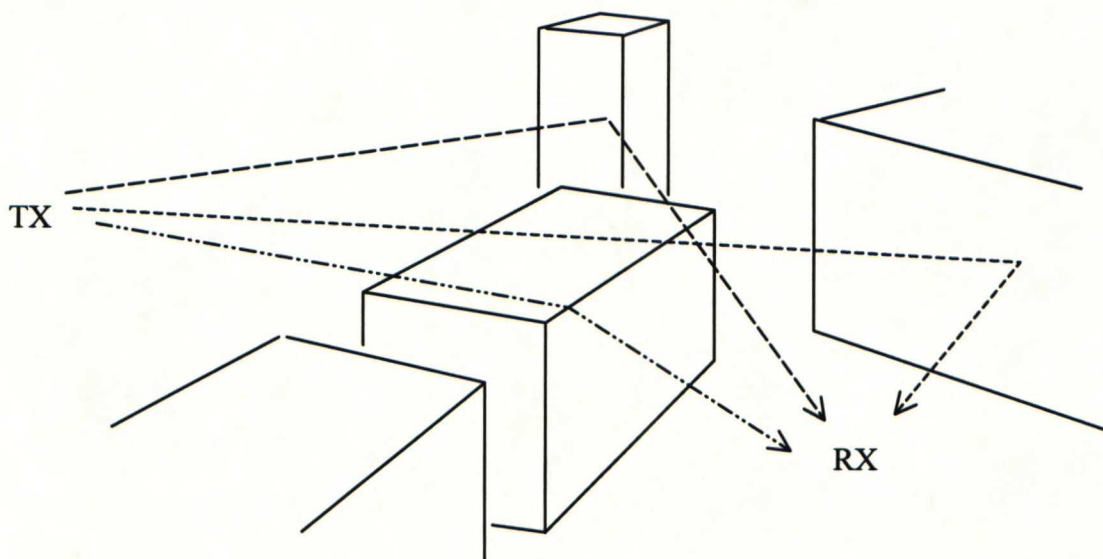
Radioaallon edetessä kattojen yli perinteinen ajatusmalli olettaa tukiaseman olevan kattotason yläpuolella ja signaalin diffraktoituvan katua reunustavan rakennuksen katon rajasta katukuiluun. Aalto diffraktoituu myös loivemmassa kulmassa katukuiluun ja heijastelee muutaman kerran edestakaisin katukuilussa ennen vastaanottimeen päätymistä, kuva 16.

Monet etenemismallit, esimerkiksi COST231-WI, olettavat että kattojen yli tuleva teho tulee suoraan tukiaseman tai sitä vastakkaiselta suunnalta ja koko etenemismekanismi voidaan käsitellä kaksiulotteisena ongelmana. Kuitenkin jos kaupunkiympäristössä rakennusten korkeudet vaihtelevat paljon tai ympäristö muuten on vaihtelevaa, näin ei välttämättä ole. Aalto voi edetä muita korkeamman rakennuksen kautta ja päätyä vasta tämän jälkeen katukuiluun ja vastaanottimeen, kuva 17.





Kuva 16. Taistuminen kadulle kattotason yläpuolelta.



Kuva 17. Heijastuminen korkeista rakennuksista.

Jos tukiasema on kattotason alapuolella, mukaan tulee vähintään yksi lisädiffraktio tai sironta ennen radioaallon pääsemistä kattojen yläpuolelle. Aalto vaimenee tässä kuitenkin ratkaisevasti, ja siksi tukiaseman korkeudella kattotason suhteen on suuri merkitys kattojen yli etenevään tehoon. Tukiasemakorkeutta kattotasoon nähden pidetäänkin ratkaisevana tekijänä, kun soluja luokitellaan mikro- ja makrosoluiksi, kts. taulukko 1.

### 4.3 Muut mekanismit

Ylläolevat mekanismit eivät vielä selitä kaikkia signaalireittejä. Mainitsematta on esimerkiksi näköyhteys. Jos lähetin on matalalla katukuilussa ja siitä on näköyhteys vastaanottimeen, voidaan etenemistä pitää katukuilu-etenemisenä, vrt. kuva 13. Muualla avarammassa tilassa voidaan etenemismekanismeja sen sijaan pitää kokonaan omana luokkana, lähinnä vapaantilan etenemistä vastaavana. Näköyhteys signaalireitillä on kuitenkin erikoistapaus ja helposti erotettavissa muista tulosuunnan, suurimman tehon ja lyhimmän etenemisviiveen perusteella.

Lisäksi on joukko vaikeasti luokiteltavia reittejä. Kauempana oleva muuta maastoa korkeampi rakennus voi toimia hyvin heijastavana pintana ja näkyä voimakkaana tulosuuntana vastaanottopäässä. Näin erityisesti, jos rakennukseen on suora näköyhteys sekä lähettimestä että vastaanottimesta. Jos heijastava pinta on kaukana, signaali voi tulla vastaanottimeen pienessä kulmassa ja näyttää katukuilua pitkin edenneeltä. On myös yleistä, että teho etenee jonkin matkaa kattojen yläpuolella, esimerkiksi diffraktoituu katukuiluun risteyksestä ja jatkaa matkaa katukuilua pitkin. Tällöin on vaikea sanoa, mihin luokkaan vastaanotettu signaali pitäisi lukea.

Joissain tapauksissa pitkää etenemisviivettä suhteessa vastaanotettuun tehoon tai riittävän odottamatonta tulosuuntaa voidaan käyttää hyväksi luokittelussa. Kaukaiset voimakkaasti heijastavat tai sirottavat kohteet on helppo tunnistaa näin.

#### 4.4 Luokittelukriteereitä

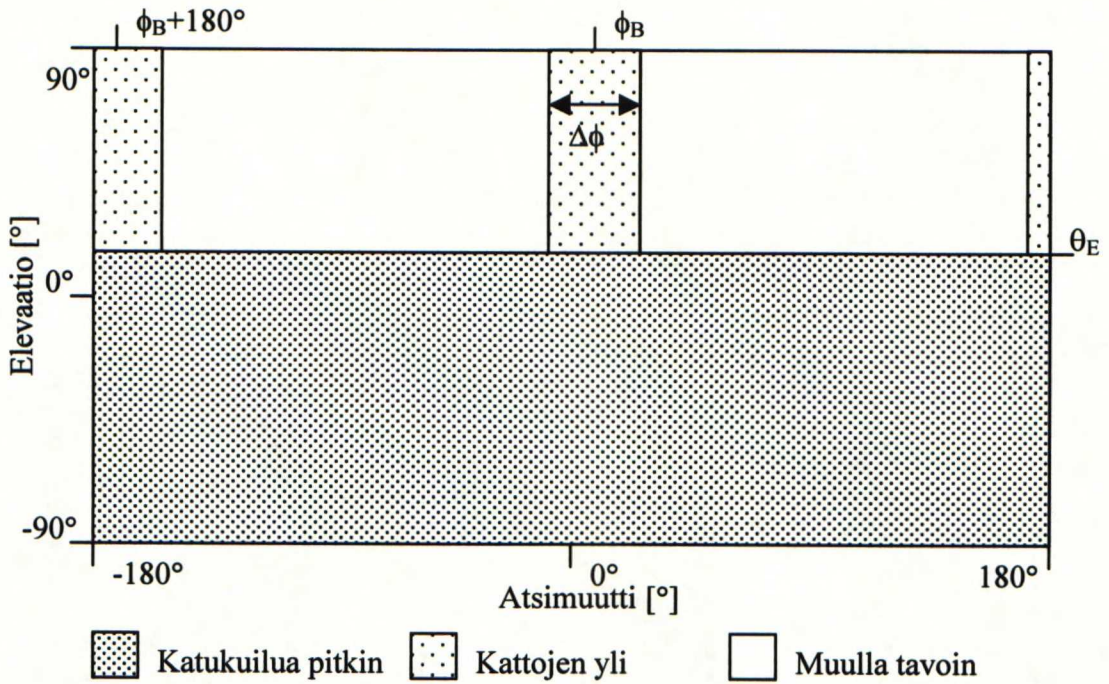
Työn lähtökohtana on tutkia signaalien etenemisreittejä kaupunkiympäristössä. Karkea keino reittien tutkimiseksi on ensin luokitella ne kolmeen luokkaan pääetenismekanismien perusteella; katukuilua pitkin edenneiksi, kattojen yli edenneiksi ja muilla tavoin edenneiksi. Tässä kattojen yli edenneiksi luetaan ainoastaan kvasi-3D-mallin (ks. kohta 3.3) mukaisesti lähettimen ja vastaanottimen välisessä poikkileikkaustasossa edenneet aallot. Katukuilua pitkin edenneet aallot muodostavat vastaavasti kvasi-3D-malleissa mukana olevan vaakatason. Jotta koko luokittelu olisi järkevää, oletetaan että kaikki tutkittavat reitit ovat kokonaisuudessaan NLOS-ympäristöissä.

Kattojen yli edenneiksi voidaan lukea kaikki signaalireitit, jotka saapuvat vastaanottimeen lähettimen ja vastaanottimen välisen poikkileikkaustason suunnalta riittävän suuresta elevaatiokulmasta, jotakin ennalta määriteltä elevaation rajakulmaa korkeammalta. Jos asetetaan kiinteä kaikilla reiteillä sovellettava rajakulma elevaatiolle, sen pitää olla melko alhainen, noin 10 astetta. Vaihtoehtoisesti se voidaan määrittellä reittikohtaisesti.

Atsimuuttisuunnassa pitää sallia pieni marginaali poikkileikkaustasoon nähden, esimerkiksi  $\pm 5 \dots \pm 15$  astetta. Samalla on helppo eritellä atsimuuttikulman perusteella suoraan lähettimen suunnasta tulevat ja vastakkaisesta suunnasta tulevat signaalit. Atsimuuttirajauksen marginaali vaaditaan, koska lähettimen suuntaa ei täysin tarkkaan pysty määrittämään ja vastaanottimen hetkellinen asento voi vaihdella muutamia asteita. Lisäksi jos diffraktoiva katonreuna ei ole kohtisuorassa saapuvaan säteeseen nähden, säteen suunta muuttuu diffraktiossa myös atsimuuttisuunnassa, ks. kohta 2.3.

Katukuiluetenemiseksi lasketaan jäljelle jäävistä tulosuunnista ne, jotka ovat edellä mainittua elevaatorajaa alempana. Atsimuuttialueessa katukuiluetenemistä ei rajata ollenkaan. Loppuja, valittua elevaatorajaa korkeammalta mutta ei lähettimen ja vastaanottimen välisestä pystytasosta saapuvia signaaleja pidetään muulla tavoin edenneinä. Kaaviokuva rajauksesta, sekä elevaation rajakulma  $\theta_E$  että lähettimen atsimuuttikulma  $\phi_B$ , sitä vastakkainen atsimuuttikulma  $\phi_B + 180^\circ$  ja atsimuuttirajauksen leveys  $\Delta\phi$  on esitetty kuvassa 18.





Kuva 18. Kaaviokuva käytettävästä rajauksesta.

Vaadittu atsimuuttirajaus kattojen yli edenneille on helppo tehdä kartan avulla. Tukiaseman sijainti ja vastaanottimen kulkema reitti on tunnettu. Ongelmaksi jää ainoastaan, miten elevaation rajakulma ja atsimuuttirajauksen leveys valitaan.

Nämä kulmat voidaan valita analysoimalla jokin tietty reitti usealla eri elevaation rajakulmalla ja atsimuuttirajauksen leveydellä. Sopivat arvot voidaan päätellä tuloksista. Liian pieni elevaation rajakulma leikkaa vastaanotettua katukuilua pitkin edennyttä tehoa luokkaan muut ja liian suuri taas leikkaa kattojen yli edennyttä tehoa. Vastaavasti liian tiukka atsimuuttirajaus rajaa osan käytännössä suoraan lähettimen ja vastaanottimen välisessä pystytasossa edenneestä tehosta luokkaan muut. Atsimuuttirajauksen leveys ei vaikuta mitenkään katukuiluetenemisen luokitteluun käytetyllä rajausmetodilla.

Tarkempaan tulokseen saattaisi päästä, jos sopiva elevaatoraja ja atsimuuttirajaus määritetään kaikille analysoitaville ympäristöille erikseen. Apuna rajakulman määrittämisessä elevaatiolle voisi käyttää mitattujen tulosuuntien avulla piirrettyä kaavioita. Näitä ovat esimerkiksi elevaatio-atsimuutti-, elevaatio-viive- ja atsimuutti-viive-kaaviot. Käyttämällä kaikkia näitä kolmea yhtäaikaan, voidaan eri reittejä tulleet signaalit erotella helposti toisistaan, erityisesti jos käytössä on jonkinlainen kartta mitatusta alueesta ja käsitys lähimpien rakennusten muodosta. Tämä kuitenkin vaatisi runsaasti käsityötä.



## 5 Laitteisto ja käsiteltävät ympäristöt

### 5.1 Laitteistokuvaus

Tässä työssä käytetty radiokanavainformaatio on mitattu IDC:n (Institute of Digital Communications) radiokanavaluotaimella [23]. Kanavaluotain koostuu erillisestä lähettimestä, vastaanottimesta, datankeruuyksiköstä ja laitteiston ohjaukseen käytettävästä tietokoneesta.

Impulssivasteet ja muu radiokanavainformaatio lasketaan datankeruuyksikön keräämistä näytteistä tietokoneella jälkikäsittelemällä. Mittauksissa käytettävä antennikonfiguraatio on valittavissa, lähettimessä käytetään yhtä elementtiä, mutta vastaanottimessa voidaan käyttää myös erilaisia antenniryhmiä. Myöhemmin laitteistoa on laajennettu tukemaan myös useita lähetysantenneja, mikä mahdollistaa MIMO-mittausten tekemisen [24]

Kanavaluotain lähettää jatkuvasti samaa tunnettua binääristä pseudosatunnaiskoodia. Käytetty koodinpituus on joko 127 tai 255 bittiä. Koodi BPSK-moduloidaan 30 MHz:n modulointitaajuudella ja lähetetään 2.154 GHz:n kantotaajuudelle sekoitettuna.

Vastaanottimessa signaali I/Q-demuloidaan ja alassekoitetaan kantataajuudelle. Saadut kaksi kantataajuista signaalia näytteistetään datankeruuyksikössä erillisillä nopeilla näytteenottokorteilla 120 MHz:n näytteenottotaajuudella ja tallennetaan reaaliajassa mittaustietokoneen kovalevyille jälkikäsitteilyä varten. Näytteitä otetaan siis neljä jokaista lähetettyä koodibittiä kohden.

Käytetyillä arvoilla impulssivasteen viiveresoluutio on

$$\Delta\tau = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{30 \text{ MHz}} = 33 \text{ ns} \quad (45)$$

Se vastaa radioaallolla ilmassa noin 10 m etenemismatkaa. Vastaavasti 127 bitin koodinpituudella viiveikkuna on  $127 \cdot 33 \text{ ns} = 4.2 \mu\text{s}$  ja 255 bitin koodinpituudella  $8.5 \mu\text{s}$ . Lyhyempi viiveikkuna riittää hyvin mikrosolussa ja pidempi viiveikkuna riittää makrosoluissakin kaikkien heijastusten taltiointiin laitteiston saavuttamalla vajaan 30 dB:n signaalikohinasuhteella. Vastaanotettavan signaalin tasoa säädetään AGC-piirillä aina mittausten välillä. AGC:n säätöalue on 72 dB.

Jälkikäsitteilyssä lasketaan radiokanavan impulssivaste vastaanotetun signaalin ja alkuperäisen koodin ristikorrelaationa. Koska sekä I- että Q-kanavat vastaanotetaan, saadaan myös vaiheinformaatio talteen amplitudin ja viiveen lisäksi. Vaiheen yksikäsitteisyys ja stabiilius varmistetaan tahdistamalla lähettimen ja vastaanottimen



kellot ennen mittausta. Sekä lähettimessä että vastaanotimessa käytetään 10 MHz:n rubidium-taajuusstandardeja. [23]

Kun vastaanotossa käytetään antenniryhmää, jokainen ryhmän elementti mitataan erikseen kytkemällä niitä vuorotellen nopealla RF-kytkimellä. Kun impulssivaste saadaan mitattua erikseen kaikille elementeille, voidaan ryhmän suuntakuviota muokata elementtejä vaiheistamalla jälkikäsittelyvaiheessa. Tämä mahdollistaa signaalien tulosuunnan ja kaksoispolarisaatioantenneja käytettäessä myös polarisaation mittaamisen. Lisäksi jokaiselta havaitulta reitiltä saadaan laskettua vaihe, viive ja amplitudi. Amplitudia laskettaessa lähetys- ja vastaanottoantennen vahvistukset on sisällytetty etenemisvaimennukseen, eli vastaanotettu suhteellinen tehotaso vastaa tilannetta, jossa kummatkin antennit olisivat olleet ympärisäteileviä. Suhteellinen tehotaso,  $P_{rel}$ , on määritelty

$$P_{rel} = -PL = 10 \log \left( \frac{P_{rx}}{P_{tx}} \right) \quad (46)$$

Reaaliaikainen datantallennus mahdollistaa radiokanavan mittaamisen hyvin tihein väliajoin, kymmeniä kertoja sekunnissa. Tällöin vastaanotinta voidaan liikuttaa mittauksen aikana ja radiokanava voidaan mitata kokonaisuudessaan pitkiltäkin reiteiltä kohtuullisen nopeasti. Ehtona liikuteltavuudelle ja tulosten yksikäsitteisyydelle on, että radiokanava pysyy muuttumattomana mittaushetken ajan. Kanavaa voidaan pitää muuttumattomana, jos vastaanotin on mittauksen aikana liikkunut vain olemattoman matkan aallonpituuksina mitattuna. Lisäksi mittaus on suoritettava tiheämmin kuin puolen aallonpituuden välein [25]. Jälkimmäinen ehto saadaan suoraan Nyquistin kriteeristä. Harvemmin mitattaessa ei samalta etenemisreitiltä kahdessa peräkkäisessä mittauksessa havaitun signaalin vaihe ja siten doppler-siirtymä ole enää välttämättä yksikäsitteinen.

Liikkumisnopeus mittaustilanteessa voi olla esimerkiksi  $v = 1.0$  m/s. Käytetyllä 2.154 GHz taajuudella aallonpituus  $\lambda = 0.14$  m. Tällöin minimi mittaustaajuus  $f_{min}$  on

$$f_{min} = 2 \frac{v}{\lambda} = 14.3 \text{ Hz} \quad (47)$$

Todellisissa mittauksissa radiokanava on mitattu varmuuden vuoksi noin viisi kertaa aallonpituuden matkalla. Käytettäessä vastaanottoon palloantennia (ks. kohta 5.2), jossa on 32 kaksoispolarisaatioantennia ja kustakin syöttöpisteestä mitataan keskiarvoistamista varten impulssivaste kaksi kertaa peräkkäin ennen seuraavaan siirtymistä, kestää yksi mittauskierros 127 bitin koodilla

$$T = \frac{2 \text{ koodia} * 127 \text{ bittiä} / \text{koodi} * 2 \text{ polarisaatiota} * 32 \text{ elementtiä}}{30000000 \text{ bittiä} / s} = 0.54 \text{ ms} \quad (48)$$

Mittauksen aikana vastaanotin on liikkunut siis vain 0.54 mm, mikä vastaa noin neljää aallonpituuden tuhannesosaa.

Kanavaluotaimen vastaanotin datankeruuyksikköineen ja erillisellä kärryllä olevalla vastaanottoon käytetyllä pallon muotoisella antenniryhmällä on kuvassa 19.





Kuva 19. Kanavaluotaimen vastaanotin ja vastaanottoon käytetty pallon muotoinen antenniryhmä.

### 5.2 Pallon muotoinen antenniryhmä

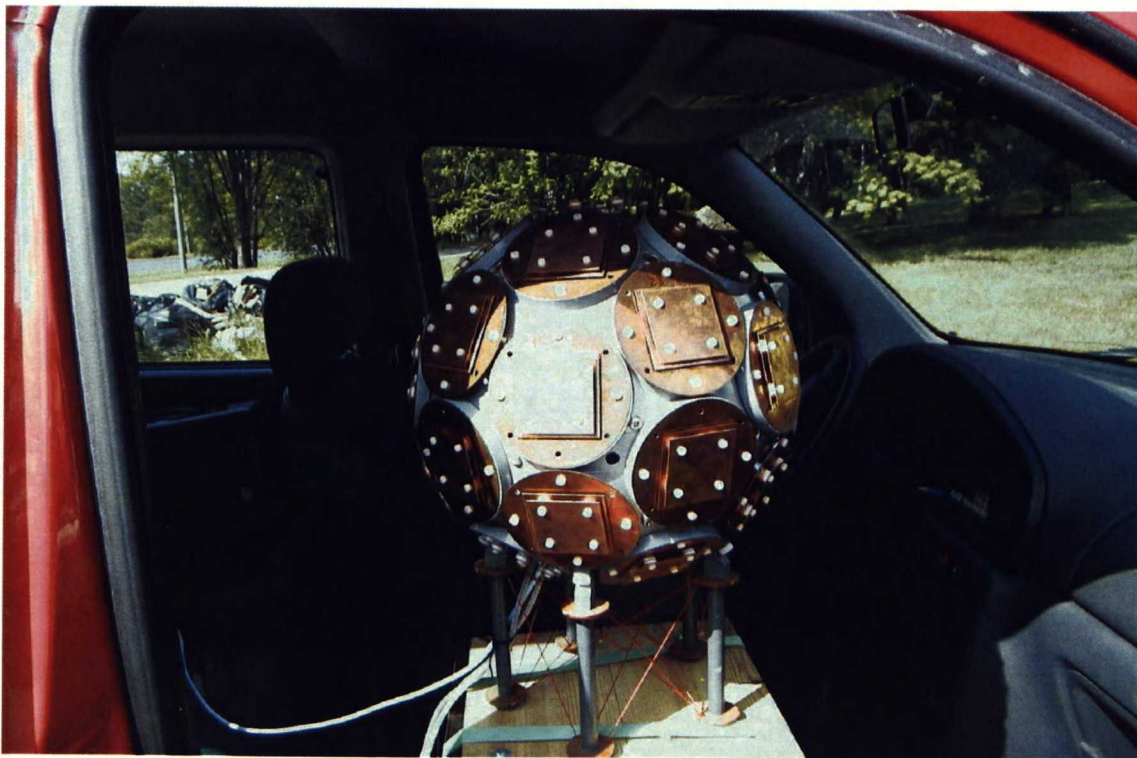
Kaikki tässä työssä käsiteltävä mittausdata on mitattu käyttäen vastaanottoon palloantennia. Pallon muotoinen antenniryhmä mahdollistaa vastaanotetun signaalin tulosuunnan laskemisen kolmiulotteisesti kaikista suunnista. Käytetty pallon muotoinen antenniryhmä koostuu 32 kaksoipolarisaatioantennista, ryhmässä on siis yhteensä 64 syöttöä ja vastaanottava antenni valitaan pallon sisään sijoitetulla 64-kanavaisella kytkimellä. Pallon säde on  $R = 170$  mm, ja lähimpien reunustavien antennielementtien etäisyys on  $0.641R$  ja seuraavien  $0.741R$ . Antenni on siis 32-tahkoinen monitahokas, sama rakenne lienee paremmin tunnettu jalkapallosta. [26]

Käytetyt antennielementit ovat keskenään identtisiä mikroliuska-antenneja ja niissä on syötöt kahdelle ortogonaaliselle polarisaatiolle. Elementin 6 dB:n keilanleveys E-tasossa on  $90^\circ$  ja H-tasossa  $100^\circ$ . Vahvistus on 7.8 dB ja ristipolarisaatiotaso 6 dB:n keilan sisäpuolella on parempi kuin 18 dB. Kuvassa 20 antenniryhmä on käyttökunnossa asennettuna autoon pelkääjän paikalle.

Mitattujen kompleksisten impulssivasteiden avulla signaalin tulosuunta voidaan jälkikäsitteilyn avulla määrittää alle  $1^\circ$ :een tarkkuudella [26]. Koska jokaisessa elementissä on syötöt kahdelle polarisaatiolle, myös vastaanotetun signaalin polarisaatiokulma saadaan määritettyä. Jälkikäsitelyssä tulosuunnat etsitään ensin karkeasti kytkemällä antenneita ryhmittäin ja sitten tarkemmin vaiheistamalla antenniryhmän elementtejä. Lisäksi elementtien sivukeiloja vaimennetaan



amplituditaperoinnilla [27]. Käytännössä suuntavirhe on suurempi, sillä mittaustilanteessa antennia on liikutettu kärryllä kaupungissa pitkin jalkakäytäviä. Tästä syntyy pakostakin muutaman asteen suuntavirheitä.



Kuva 20. Pallon muotoinen antenniryhmä autoon asennettuna.

### 5.3 Käsiteltävät ympäristöt

Viisi erillistä mittausreittiä valittiin käsiteltäviksi. Kaksi niistä edustaa tyypillistä mikrosolutilannetta, jossa lähetin on kattotason alapuolella ja mittaus suoritetaan alle puolen kilometrin päässä, etäisyys vaihteli 0.1 ja 0.42 km:n välillä. Mikrosolureitit mitattiin kahdella eri lähetinantennikorkeudella. Loput kolme reittiä edustavat pientä makrosolua, jossa lähetin on kattotason yläpuolella ja vastaanotin 0.14-0.63 km:n etäisyydellä.

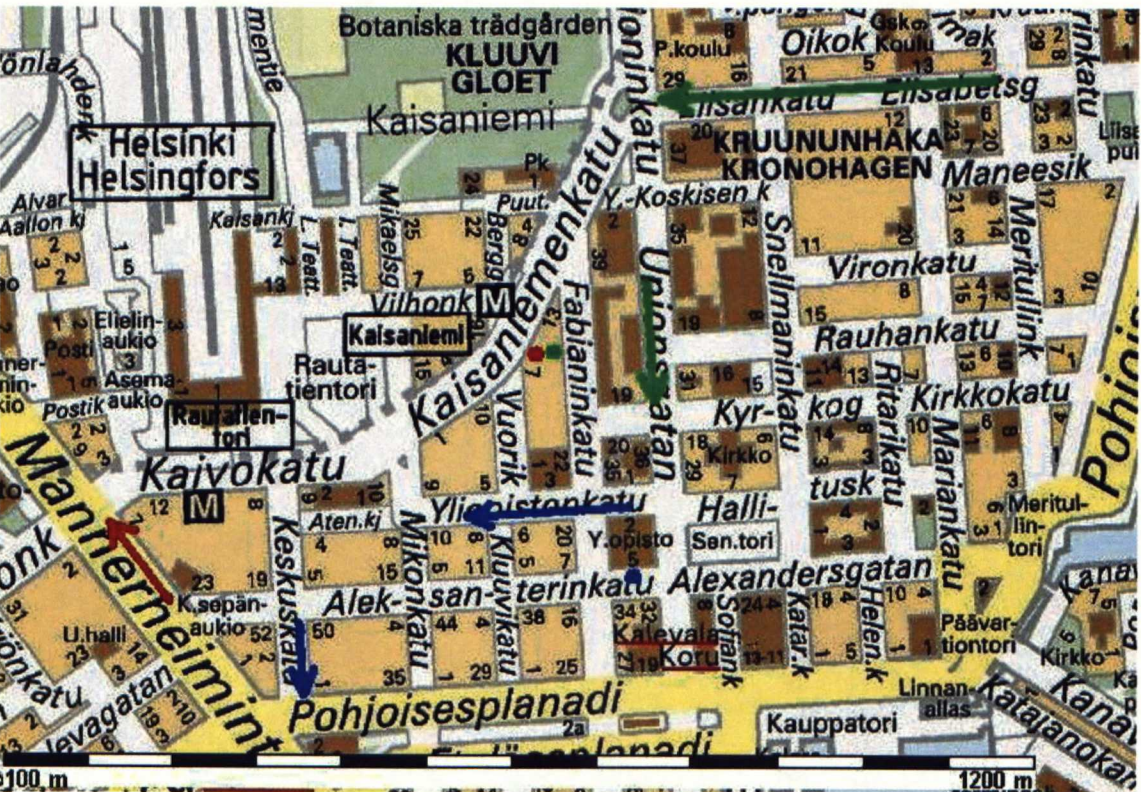
Kaikki mittaukset suoritettiin touko-kesäkuussa 2000 Helsingin keskustassa. Lähettimen sijainnit ja mitatut reitit on esitetty kuvassa 21. Kartassa lähetin on merkitty pisteellä ja mitattu reitti nuolella. Nuolen suunta osoittaa etenemissuunnan reittiä mitattaessa. Kaikissa mittauksissa vastaanottoon käytettiin pallon muotoista antenniryhmää ja lähetinantennina suuntaavaa tukiasema-antennia.

Mikrosolumittauksessa (merkitty sinisellä) lähetinantenni oli Aleksanterinkadulla 3 ja 13 m:n korkeudella maanpinnasta ja mitatut reitit olivat Keskuskadulla ja Yliopistonkadulla. Makrosolumittauksissa (merkitty punaisella ja vihreällä) lähetin oli kauppakeskus Kaisan parkkihallin katolla, reitistä riippuen joko itäisellä tai läntisellä laidalla. Mitatut reitit olivat Liisankadulla, Unioninkadulla ja Mannerheimintienellä.



## 5. Laitteisto ja käsiteltävät ympäristöt

Mittauseittien pituudet, etäisyydet tukiasemasta reitin alku- ja loppupäässä ja reiteiltä mitattujen näytteiden määrät on esitetty taulukossa 4. Kukin näyte sisältää kaikki yhdessä kohdassa vastaanotetut signaalikomponentit tulosuuntineen.



Kuva 21. Käsiteltävät reitit.

Taulukko 4. Mitattujen reittien pituudet.

Reitti	Näytteitä yhteensä	Reitin pituus [m]	Etäisyys tukiasemasta reitin alussa [m]	Etäisyys tukiasemasta reitin lopussa [m]
Keskuskatu	4480	115	400	420
Yliopistonkatu	6720	170	100	200
Unioninkatu	4960	125	150	140
Liisankatu	15600	400	630	340
Mannerheimintie	4640	120	530	550

Mitatut reitit on jäkikäsittelyvaiheessa jaettu 30-190 erilliseksi tiedostoksi, joissa kussakin on näytteitä 2-4 m matkalta. Tukiaseman suuntaa on seurattu tiedostokohtaisesti, yhteysvälin ollessa satoja metrejä kulma muuttuu yhden tiedoston kattamalla matkalla hyvin vähän.

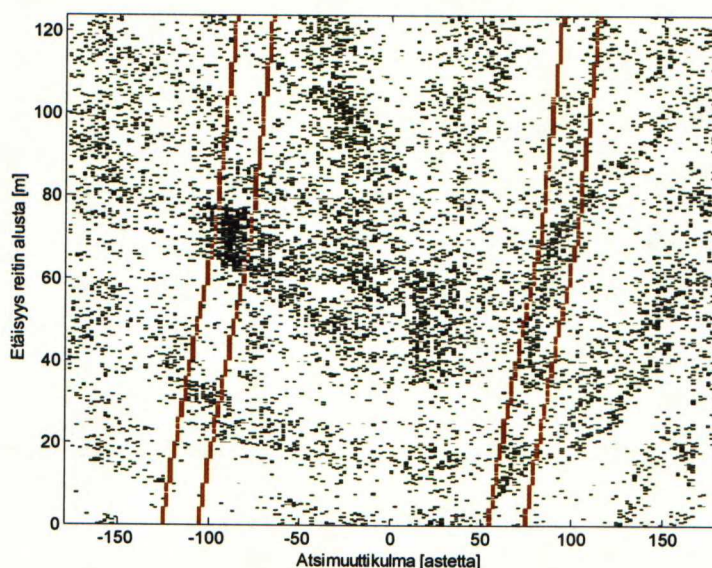
### 5.4 Atsimuuttirajauksen vaikutus tuloksiin

Kun luokitellaan vastaanotettua tehoa tulosuunnan perusteella, oleellista on, että rajauskulmat ovat järkeviä. Atsimuuttirajauksen merkitystä koko analyysin



lopputulokseen on pyritty arvioimaan tekemällä koko luokittelu yhdellä reitillä muuttamalla atsimuuttirajauksen leveyttä välillä  $4-40^\circ$  ( $\pm 2-20^\circ$  tukiaseman suunnasta) elevaation rajakulman ollessa vakio,  $\theta_E = 10^\circ$ .

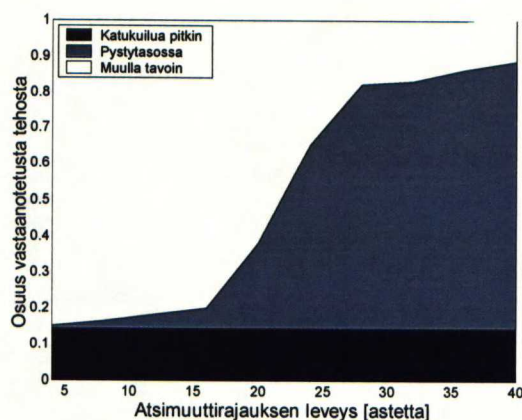
Rajauskulmien valinnan vaikutuksen analysointiin on käytetty Unioninkadulla ja Mannerheimintiellä mitattuja reittejä. Unioninkadulta vastaanotettujen signaalien atsimuuttisuunnat matkan funktiona on esitetty kuvassa 22. Kuvassa ei ole huomioitu mitenkään signaalien elevaatiota tai tehoa. Kuvaan on piirretty myös käytetyn atsimuuttirajauksen kulmat, jos rajauksen leveys on  $20^\circ$  ( $\pm 10^\circ$  tukiaseman suunnasta). Atsimuuttikulma  $0^\circ$  osoittaa kulkusuuntaa kohden, ja kulma kasvaa oikealle päin.



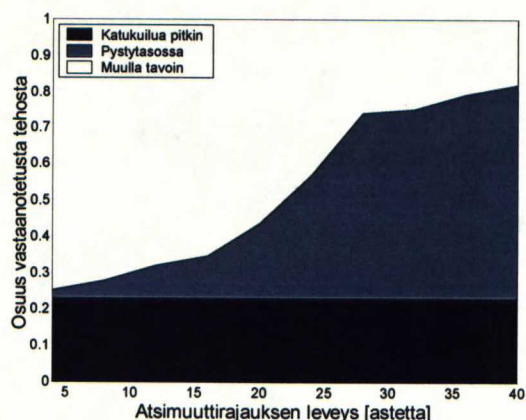
**Kuva 22.** Vastaanotettujen signaalien atsimuuttikulmat ja atsimuuttirajaus.

Tulokset on esitetty kuvissa 23 ja 24. Ensimmäisessä kuvaajassa tehot ovat normalisoimattomia ja toisessa tehot ovat normalisoitu näytekohteisesti. Normalisointi on perusteltua, kun halutaan tutkia paljonko kukin mekanismi tuo tehoa kullakin ajanhetkellä, ei kaikenkaikkiaan. Normalisoimattomassa tapauksessa lyhyt voimakas signaali voi vaikuttaa lopputulokseen huomattavasti.

Kuvista havaitaan, että atsimuuttirajauksen leveyden ollessa alle  $16^\circ$ , kasvaa tukiaseman suunnalta vastaanotettu teho lineaarisesti. Tämän jälkeen teho kasvaa jyrkemmin, erityisesti normalisoimattomassa tapauksessa. Tämä tarkoittaa, että mukaan on tullut yli kymmenen astetta tukiaseman suunnalta sivuun tulleita voimakkaita signaalikomponentteja. Näitä ei välttämättä voida pitää haettuina kvasi-3D-mallin mukaisessa pystytasossa edenneinä signaaleina, vaan ennemminkin muulla tavoin edenneinä. Näin ollen atsimuuttirajauksen leveys  $16^\circ$  vaikuttaa perustellulta. Pienemmillä arvoilla tulosuuntia luokittelemalla saadut tulokset riippuvat lineaarisesti rajauskulman leveydestä, kun taas suuremmilla mukaan tulee kummallakin tässä analysoidulla reitillä oletettavasti muulla tavoin edenneitä voimakkaita signaalikomponentteja.

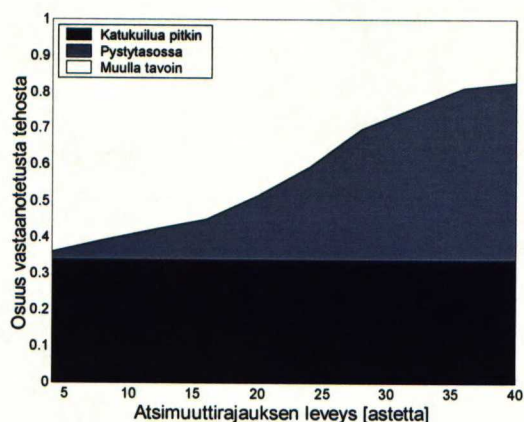


(a)

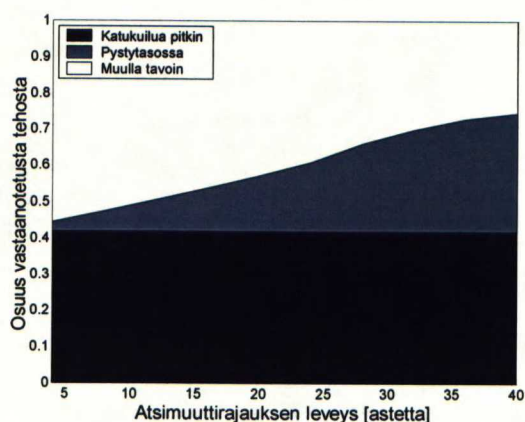


(b)

**Kuva 23.** Atsimuuttirajauksen leveyden vaikutus tuloksiin, (a) normalisoimattomassa ja (b) normalisoidussa tapauksessa Unioninkadulla.



(a)



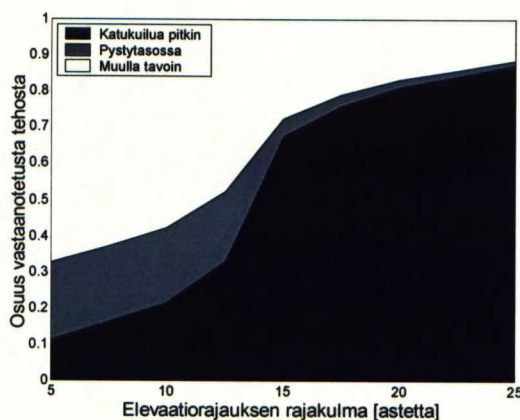
(b)

**Kuva 24.** Atsimuuttirajauksen leveyden vaikutus tuloksiin, (a) normalisoimattomassa ja (b) normalisoidussa tapauksessa Mannerheimintiellä.

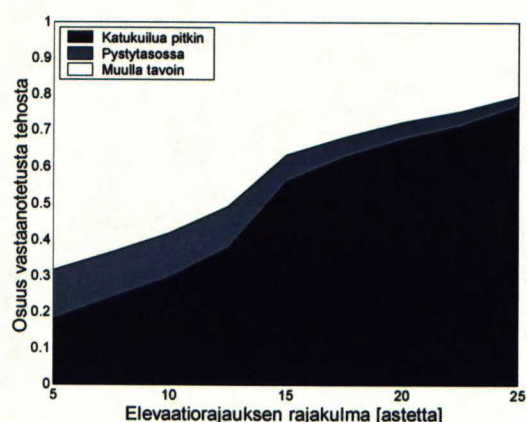
### 5.5 Elevaatorajauksen vaikutus tuloksiin

Jotta elevaatorajauksen vaikutusta tuloksiin voitaisi arvioida, analysoitiin Unioninkadulla mitattu reitti elevaation rajauskulmilla  $5-25^\circ$  pitämällä atsimuuttirajauksen leveyttä vakiona,  $\Delta\phi = 16^\circ$ . Tulokset on esitetty kuvassa 25. Kuvaan 25 (a) on laskettu kuhunkin luokkaan tullut kokonaisteho elevaatorajauksen funktiona ja kuvaan 25 (b) mitatut tehot on ensin normalisoitu näytekohtaisesti.





(a)



(b)

**Kuva 25.** Elevaatorajauksen rajakulman vaikutus tuloksiin, (a) normalisoimattomassa ja (b) normalisoidussa tapauksessa.

Tulokset osoittavat, että alle  $10^\circ$  asteen rajakulmilla tukiaseman ja vastaanottimen väliseltä pystytasolta vastaanotetun tehon osuus on varsin vakio. Kun rajakulmaa tästä kasvatetaan, alkaa osuus laskea ja yli  $15^\circ$  asteen rajauskulmilla osuus on mitätön.

Tämän perusteella sopiva arvo elevaatorajaukseen on juuri  $10^\circ$ . Pienempi arvo rajaa katukuilua pitkin edennyttä tehoa tarpeettomasti luokkaan muut, ja suurempi taas leikkaa osan pystytasossa edenneestä tehosta katukuiluetenemiseksi.

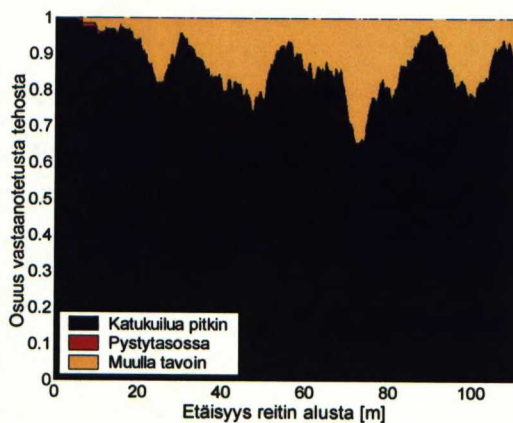
## 6 Tulokset

### 6.1 Etenemismekanismit mikrosolussa eri tukiasemakorkeuksilla

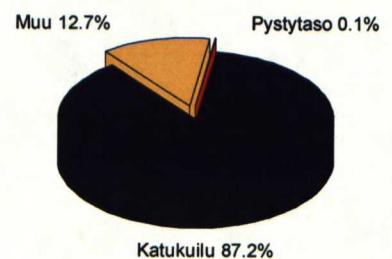
Mikrosolureitit Keskuskadulla ja Yliopistonkadulla on mitattu kahdella tukiasemakorkeudella, 3 ja 13 metriä. Vastaanotetut signaalit luokiteltiin kohdan 4.4 mukaisesti. Luokittelussa käytettiin elevaation rajakulmaa  $\theta_E = 10^\circ$  ja atsimuuttirajauksen leveyttä  $\Delta\phi = 16^\circ$ . Luokittelemalla saaduista tuloksista on laskettu eri mekanismien suhteelliset osuudet tutkittavalla reitillä ja lisäksi tuloksia on verrattu Har-Xia-Bertoni- ja COST231-WI-mallien antamiin etenemisvaimennuksiin.

Tutkittaessa eri etenemismekanismien suhteellisia osuuksia vastaanotetut tehot on normalisoitu näytekohtaisesti ja keskiarvoistettu liukuvalla ikkunalla 10 aallonpituuden matkalta. Piirakkadiagrammi eri luokista koko reitin matkalta kuvaa kunkin mekanismin kautta saapuvan tehon näytekohtaista keskimääräistä osuutta vastaanotetusta tehosta, eli myös se on laskettu normalisoinnin jälkeen.

Keskuskadulta saadut tulokset 3 m lähetinkorkeudelle on esitetty kuvassa 26 ja 13 m lähetinkorkeudelle kuvassa 27. Tulokset Yliopistonkadulta eri tukiasemakorkeuksille ovat kuvissa 28 ja 29.



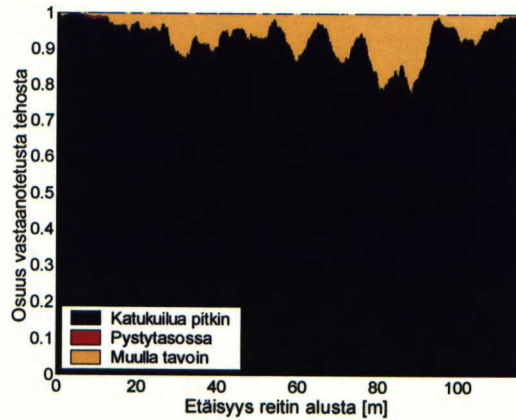
(a)



(b)

**Kuva 26.** Eri mekanismeilla edennyt teho Keskuskadulla 3 m tukiasemakorkeudella, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.



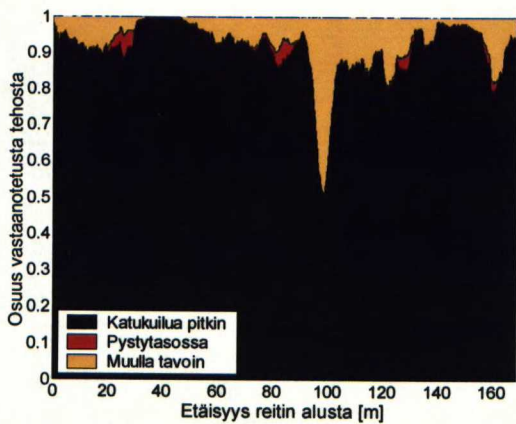


(a)

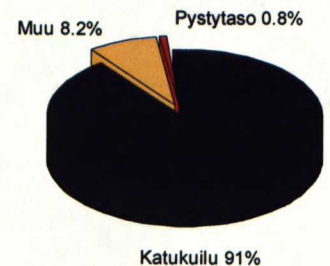


(b)

**Kuva 27.** Eri mekanismeilla edennyt teho Keskuskadulla 13 m tukiasemakorkeudella, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.

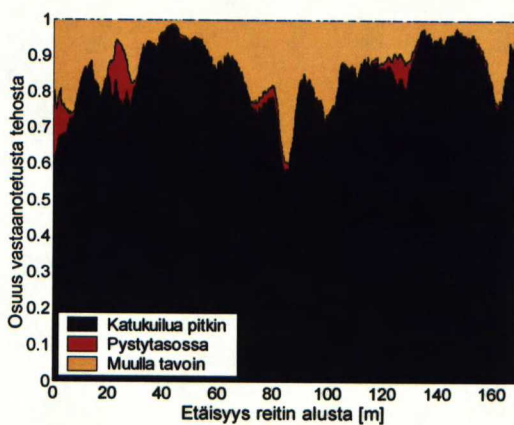


(a)

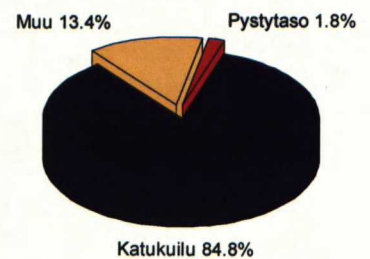


(b)

**Kuva 28.** Eri mekanismeilla edennyt teho Yliopistonkadulla 3 m tukiasemakorkeudella, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.



(a)

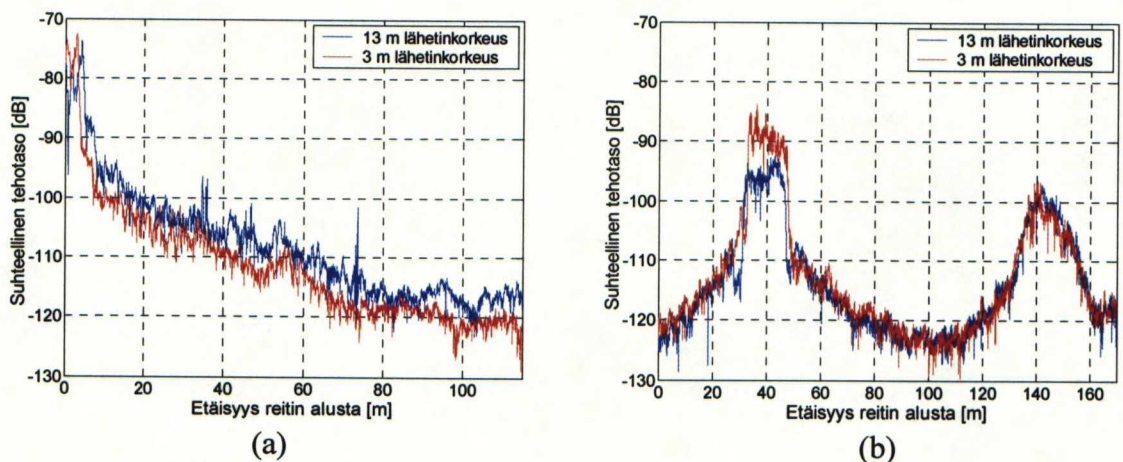


(b)

**Kuva 29.** Eri mekanismeilla edennyt teho Yliopistonkadulla 13 m tukiasemakorkeudella, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.

Yllättävää Keskuskadun tuloksissa on katukuiluetenemisen suurempi ja muun etenemisen pienempi osuus vastaanotetusta tehosta 13 m tukiasemakorkeudella kuin 3 m tukiasemakorkeudella. Juuri päinvastainen tulos olisi ollut odotetumpi. Usein oletetaan, että tukiaseman ollessa lähempänä katonreunaa, suurempi osa tehosta pääsee etenemään kattojen yli [8]. Nyt kattojen yli edenneen tehon osuus nimenomaan laskee. Kattojen yli edenneen tehon pieni osuus kokonaistehosta sen sijaan on hyvin luonnollinen. Kumminkin tukiasemakorkeudet, 3 ja 13 m, ovat kattotason alapuolella. Tukiasemaa reunustavien rakennusten korkeus on noin 15 m. Ainoa kohta, jossa kattojen yli luokiteltavaa tehoa vastaanotetaan Keskuskadulla, on aivan reitin alkupäässä kummallakin tukiasemakorkeudella. Tämäkin on oikeastaan nurkkadiffraktio, sillä ensimmäinen rakennus reitin alussa oikealla puolella on huomattavasti muita matalampi, joten korkeammalla katukuilussa edennyt teho diffraktoituu poikkikadulle vasta seuraavan rakennuksen kulmasta. Yliopistonkadulla kattojen yli tulee tehoa muutamassa kohdassa reittiä. Vaikka suoraan kattojen yli tulleen tehon osuus ei olekaan suuri, se nousee selvästi nostettaessa tukiasemaa 3 m:stä 13 m:iin.

Kuvassa 30 on esitetty tukiasemakorkeuden vaikutus vastaanotettavaan tehoon mitatuilla mikrosolureiteillä. Keskuskadulla tukiaseman korkeuden kasvattaminen vähentää vaimennusta, kuten yleisesti oletetaankin [13]. Vastaanotettujen tehojen erotus eri tukiasemakorkeuksien välillä näyttää olevan vakio lähes koko reitin matkalla, noin 3-5 dB. Yliopistonkadulla vastaanotetaan lähes sama teho kummallakin tukiasemakorkeudella. Tämä johtunee siitä, että teho on edennyt kahden nurkkadiffraktion kautta. Myös maaston muodot lienevät vaikuttaneet asiaan. Yliopistonkatu on pienen mäen päällä verrattuna Aleksanterinkatuun, jolla lähetin oli.



Kuva 30. Etenemisvaimennus eri tukiasemakorkeuksilla (a) Keskuskadulla ja (b) Yliopistonkadulla.

Verrattaessa saatuja tuloksia Har-Xia-Bertoni-malliin, on edellä erotellut pystytasossa eteneminen ja muulla tavoin edennyt teho yhdistetty vastaanmaan mallin kattojen yli ja porrasreittiä etenevää tehoa, ja laskettu katukuilueteneminen vastaa mallin suoraa katukuiluetenemistä.

COST231-WI-malli ei erittele pysty- ja vaakaetenemistä mitenkään. Mallia on verrattu sellaisenaan sekä katukuilua pitkin edenneeseen että muulla tavoin edenneeseen tehoon. Pelkkään pystytasossa etenemiseen vertaaminen ei onnistu mikrosolureitillä, sillä tehoa



## 6. Tulokset

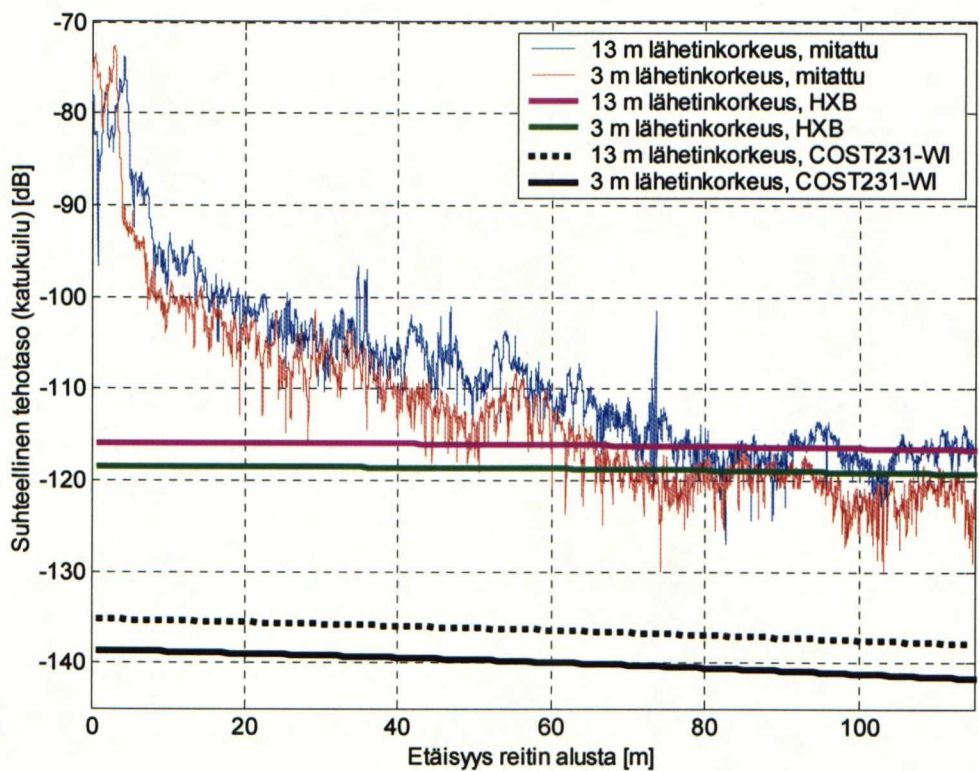
on vastaanotettu ko. suunnilta ainoastaan hetkittäin tai se on hukkunut vastaanottimen kohinaan. Taulukossa 5 on vertailussa käytetyt mallien vaatimat parametrit.

**Taulukko 5.** Vertailussa käytetyt parametrit malleille mikrosolumittauksessa.

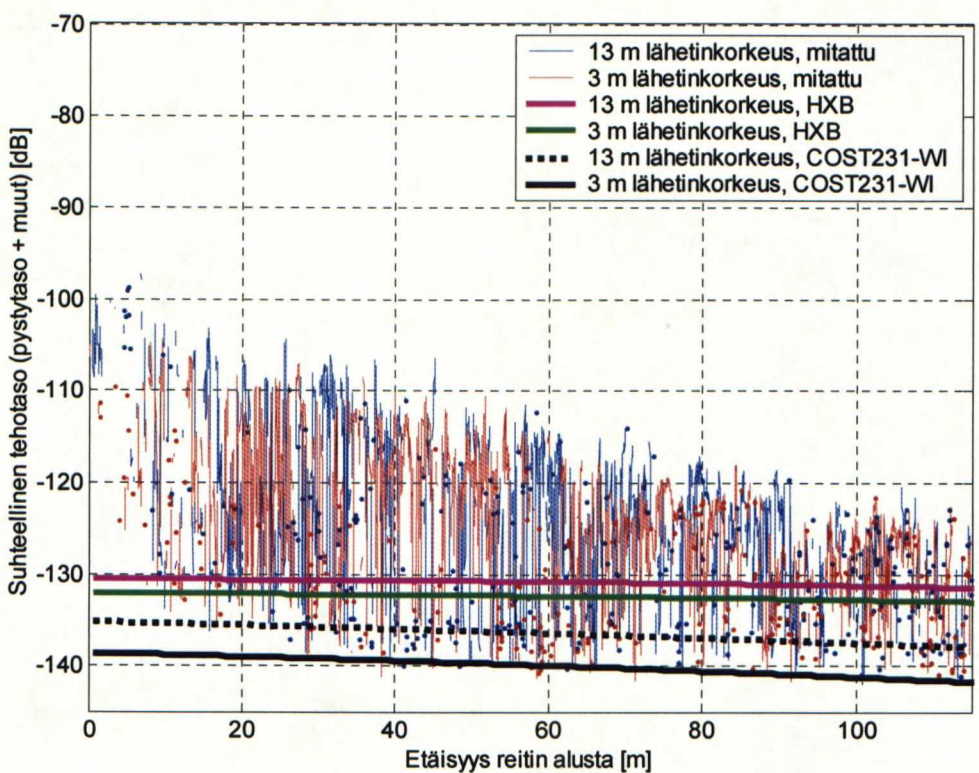
	Har-Xia-Bertoni	COST231-WI
Taajuus	2 GHz	2000 MHz
Tukiasemakorkeus	3 ja 13 m	3 ja 13 m
Mobiilin pään korkeus	-	1.6 m
Rakennusten korkeus	-	20 m
Kadun leveys	-	15 m
Rakennusten välimatka	-	100 m
Kadun suunta		
-Keskuskatu	-	89.9° ... 74.0°
-Yliopistonkatu	-	84.8° ... 29.7°

Kuvasta 31 käy ilmi, että Har-Xia-Bertoni-malli antaa Keskuskadulla varsin hyviä tuloksia kauempana risteyksestä, mitatun reitin loppupäässä. Reitti alkaa Keskuskadun ja Aleksanterinkadun risteyksestä, jolloin alkupätkä on hyvin lähellä näköyhteystilannetta. Myös ennustettu muu kuin katukuilua pitkin edennyt teho on oikeaa suuruusluokkaa, kuten myös tukiasemakorkeuden vaikutus vastaanotettavaan tehoon, kuva 32.

Keskuskadulla COST231-WI-malli ennustaa reilusti liian suuren etenemisvaimennuksen. Virhe on reitin loppupäässäkin noin 20 dB. Verrattaessa mallin antamia arvoja muuhun kuin katukuiluetenemiseen, ennustettu etenemisvaimennus on yhä yli 10 dB liian suuri. Huono tulos selittyy osin sillä, ettei COST231-WI-malli huomioi varsinaista katukuiluetenemistä ollenkaan. Malli yleensäkin antaa huonoja tuloksia kattotason alapuolisille tukiasemakorkeuksille eli mikrosoluympäristössä [10].



Kuva 31. Mitattu katukuilu-eteneminen Keskuskadulla verrattuna etenemismalleihin.



Kuva 32. Mitattu muu kuin katukuilu-eteneminen Keskuskadulla verrattuna etenemismalleihin.

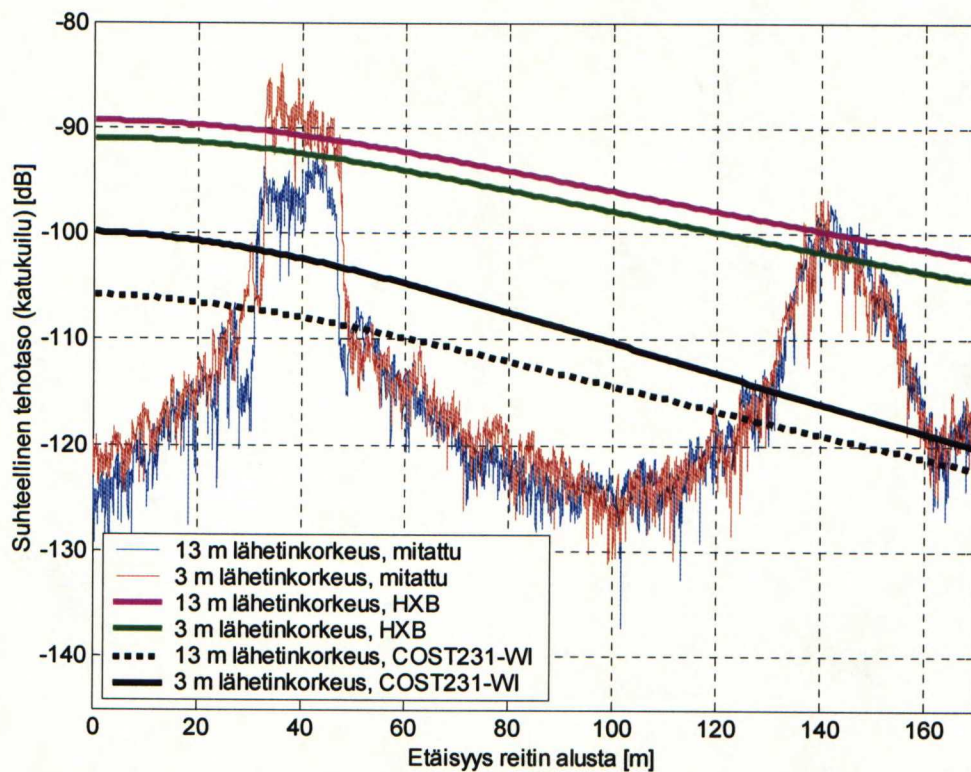


Vertailu etenemismalleihin rinnakkaisella kadulla mikrosolussa on esitetty kuvissa 33 ja 34. Yliopistonkadulla Har-Xia-Bertoni ennustaa oikein ainoastaan ylitettävien risteyskiesien kohdalla. Se selvästi olettaa yhden kadun nurkan etenemisreitille, mutta rinnakkaisella kadulla kahden nurkan takana se ei enää ennusta oikein. Kuvasta 34 havaitaan, että 3 m:n lähetinkorkeudella ei ensimmäisen risteyskiesien kohdalla noin 40 m päässä reitin alusta ole vastaanotettu ollenkaan tehoa muualta kuin katukuilua pitkin. Siinä katukuilua pitkin edenyt teho on ollut yli 30 dB voimakkaampaa kuin muualla, eikä mittausjärjestelmän dynamiikka enää ole riittänyt reittien erottamiseen.

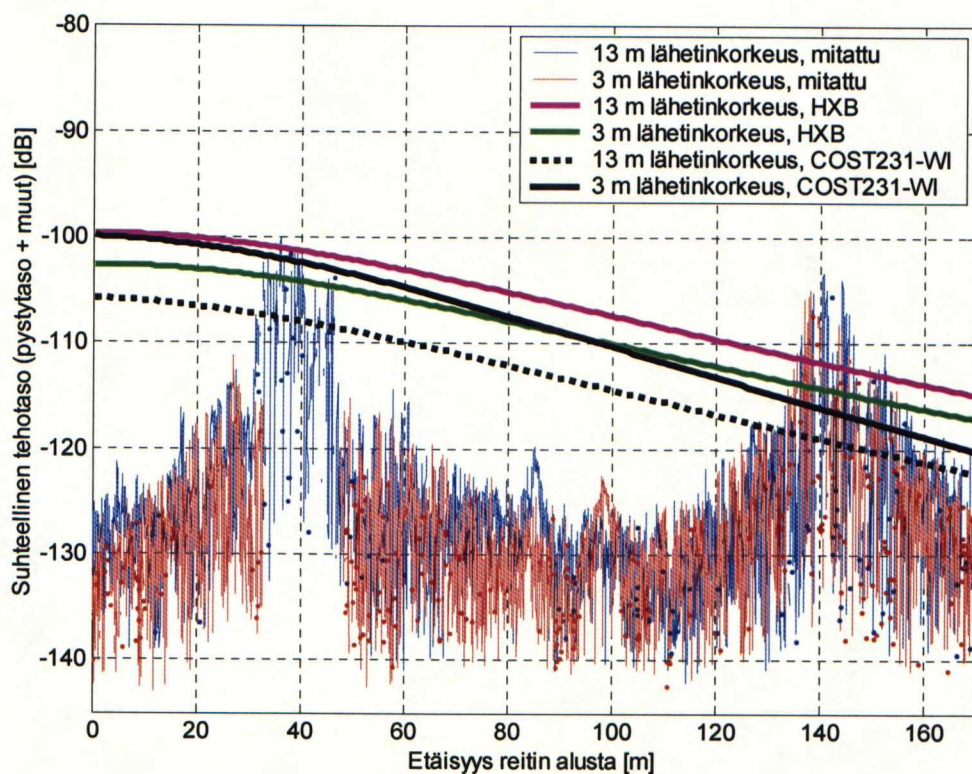
Har-Xia-Bertoni-malliin verrattuna COST231-Walfisch-Ikegami antaa keskimäärin huomattavasti paremmat ennusteet. Näin siitäkin huolimatta, että Har-Xia-Bertoni on varsinainen mikrosolumalli ja COST231-WI:tä on ainoastaan laajennettu kattamaan myös mikrosolut. Toisin kuin Keskuskadulla, Yliopistonkadulla COST231-WI ennustaa hieman liian pienen etenemisvaimennuksen. COST231-WI:n hyvä suorituskyky lienee lähinnä sattumaa tai malliin sisältyvien empiiristen korjausketoimien ansiota. Malli pyrkii ennustamaan etenemisvaimennusta olettamalla kattojen yli etenemisen tärkeimmäksi mekanismiksi, ja siitä ei tässä mittauksen perusteella ole kysymys.

Käsiteltyillä mikrosolureiteillä erottuu hyvin risteysten vaikutus, kun katukuiluetaeneminen on dominoivaa. Keskuskadulla vastaanotettava teho laskee nopeasti reitin alussa olevasta risteyskiesistä pois päin liikuttaessa. Yliopistonkadulla mitattu reitti ylittää kaksi näköyhteysreitille johtavaa risteystä. Nämä kummatkin havaitaan yli 20 dB signaalitason nousuna. Tämä on luonnollista, jos vastaanotettu teho tulee rinnakkaiselle kadulle pääosin katukuiluetaenemisenä näitä poikittaisia katuja pitkin.

Tulosten perusteella katukuiluetaeneminen on selvästi dominoiva mekanismi mikrosolussa. Pienimmilläänkin katukuilua pitkin edennyt teho on noin 10 dB voimakkaampaa kuin muualla tavoin, eli muut etenismekanismit muodostavat mikrosolussa alle 10% vastaanotetusta tehosta ja ne voitaneen jättää huomiotta. Myös Har-Xia-Bertoni-mallin mukaan katukuiluetaenemisen kaavaa tulisi näissä tapauksissa käyttää. Sen antamat ennusteet ovatkin hyviä risteävällä kadulla. Rinnakkaisella kadulla virheet ovat suuria.



Kuva 33. Mitattu katukuilu-eteneminen Yliopistonkadulla verrattuna etenemismalleihin.



Kuva 34. Mitattu muu kuin katukuilu-eteneminen Yliopistonkadulla verrattuna etenemismalleihin.



Etenemismallien hyvyttä on arvioitu laskemalla mittaustulosten ja mallien antamien ennusteiden väliset RMS-virheet, keskivirheet ja virheiden keskihajonta. Näitä parametreja on yleisesti käytetty kirjallisuudessa etenemismallien ja mittausten vertailuun [16]. Virhettä laskettaessa malleja on verrattu ainoastaan vastaanotettuun kokonaistehoon. Etenemismallien ja mittaustulosten väliset virheet Keskuskadulla on esitetty taulukossa 6 ja Yliopistonkadulla taulukossa 7.

**Taulukko 6.** Mittaustulosten ja etenemismallien välinen virhe, Keskuskatu.

	RMS-virhe [dB]	Keskivirhe [dB]	Virheen hajonta [dB]
Keskuskatu, 3 m			
COST231-WI	29.9	-28.5	9.0
HXB, katu	12.1	-7.4	9.6
HXB, muu	23.1	-21.0	9.6
Keskuskatu, 13 m			
COST231-WI	29.8	-28.5	8.7
HXB, katu	12.5	-8.4	9.2
HXB, muu	24.8	-23.0	9.2

**Taulukko 7.** Mittaustulosten ja etenemismallien välinen virhe, Yliopistonkatu.

	RMS-virhe [dB]	Keskivirhe [dB]	Virheen hajonta [dB]
Yliopistonkatu, 3 m			
COST231-WI	11.8	4.4	10.9
HXB, katu	19.2	16.3	10.1
HXB, muu	11.0	4.2	10.2
Yliopistonkatu, 13 m			
COST231-WI	10.1	1.0	10.1
HXB, katu	21.4	19.1	9.6
HXB, muu	12.7	7.9	9.9

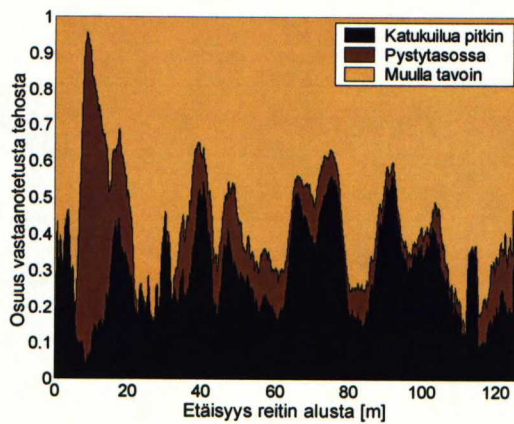
Vaikka Har-Xia-Bertoni-mallin katukuiluetenemisen kaava ennustaakin hyvin vastaanotettavan tehon Keskuskadulla mitatun reitin loppupäässä, suuri virhe alkupäässä nostaa RMS-virhettä paljon. Sen sijaan Yliopistonkadulla Har-Xia-Bertoni-mallin muun etenemisen kaava on parempi kuin katukuiluetenemisen kaava, vaikka sitä kuuluisi rinnakkaisella kadulla käyttää.

COST231-WI antaa huomattavasti paremmat ennusteet rinnakkaisella kadulla, kuin poikittaisella. Tämä johtunee siitä, että katukuilueteneminen on vaimennut huomattavasti enemmän rinnakkaisella kadulla, ja vastaanotettava tehotaso on siten huomattavasti matalampi. Parempi ennuste lienee siten lähinnä sattumaa. Yliopistonkadulla mitatun reitin loppupäässä COST231-WI-mallin antamat ennustukset ovat hyviä.

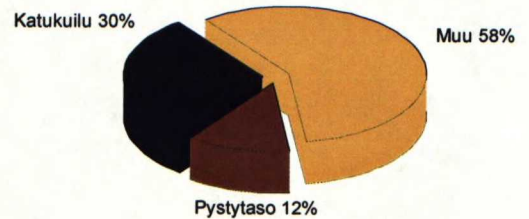
## 6.2 Etenemismekanismit pienessä makrosolussa

Tutkittaessa eri etenemismekanismien osuutta vastaanotettavasta tehosta makrosoluympäristössä, tehtiin luokittelu ja mittaustulosten käsittely samalla tavoin kuin mikrosolussa. Käytetty elevaation rajakulma oli  $\theta_E = 10^\circ$  ja atsimuuttirajauksen leveys  $\Delta\phi = 16^\circ$ . Vastaanotetut tehot on normalisoitu näytekohtaisesti ja keskiarvoistettu liukuvalla ikkunalla 10 aallonpituuden matkalta. Myös vertaaminen etenemismalleihin on tehty kuten edellä mikrosolumittauksissa.

Ensimmäinen makrosolureitti on mitattu Unioninkadulla lähentinantennin ollessa kauppakeskus Kaisan parkkihallin katolla. Eri mekanismien suhteelliset osuudet matkan funktiona ja kaikkiaan ovat kuvassa 35.



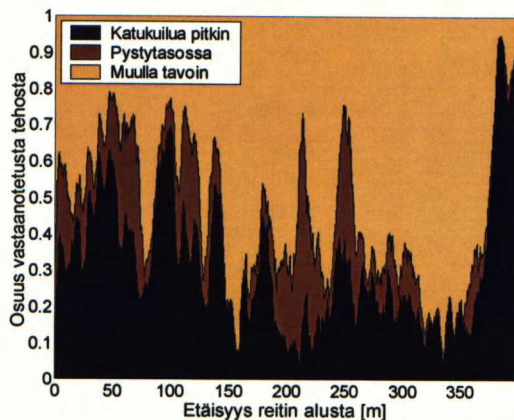
(a)



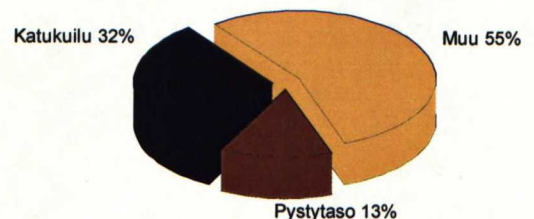
(b)

**Kuva 35.** Eri mekanismeilla edennyt teho Unioninkadulla mitatulla reitillä, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.

Toinen makrosolureitti on mitattu Liisankadulla lähettimen ollessa samassa paikassa kuin edellä. Vastaanotetut tehot on esitetty luokittain kuvassa 36.



(a)

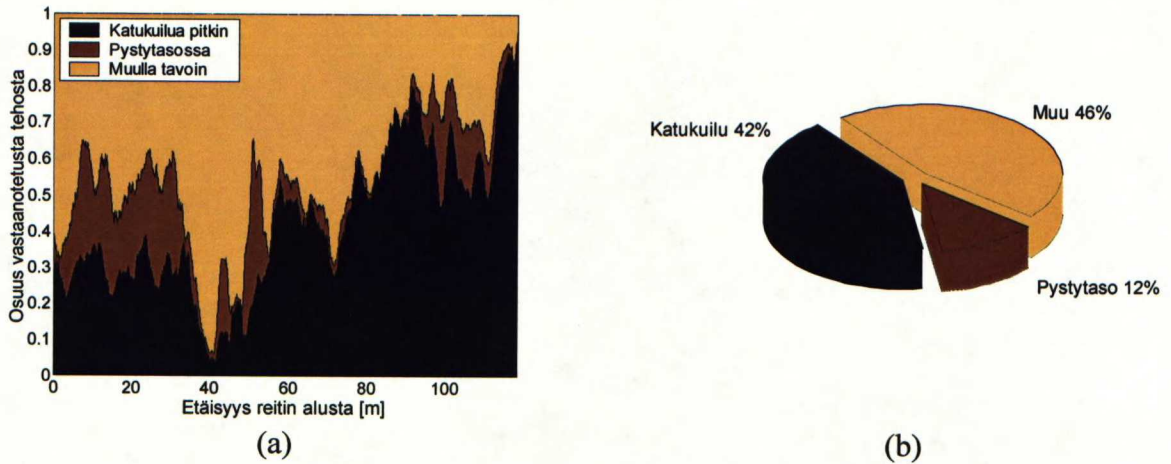


(b)

**Kuva 36.** Eri mekanismeilla edennyt teho Liisankadulla mitatulla reitillä, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.



Kolmas makrosolureitti on mitattu Mannerheimintielle lähettimen ollessa kauppakeskus Kaisan parkkihallin katolla Mannerheimintien puoleisella laidalla. Eri mekanismeimein edenneet tehot on kuvassa 37.



**Kuva 37.** Eri mekanismeilla edennyt teho Mannerheimintielle mitatulla reitillä, (a) matkan funktiona ja (b) yhteensä.

Kun edellä esitettyjä pienessä makrosolussa havaittuja eri etenemismekanismien keskinäisiä osuuksia verrataan mikrosolumittauksissa saatuihin tuloksiin, on ero melkoinen. Valtaosa tehosta etenee muulla tavoin kuin katukuilua pitkin tai kattojen yli. Toisin kuin mikrosolussa, makrosolussa vastaanotetaan kattojen yli tulluttakin tehoa merkittäviä määriä, 12-13% kaikesta tehosta. Katukuilua pitkin saadaan 30-42% tehosta, mikrosolumittauksissa sama luku oli yli 90%.

Tulosten mukaan luokitelluista etenemismekanismeista luokka muut on merkittävin. Kuitenkin hetkittäin myös kattojen yli ja katukuiluapitkin tulee yli puolet vastaanotetusta tehosta. Eri luokkien kautta vastaanotettujen tehojen suhteellinen osuus vaihtelee mittausreiteillä nopeasti matkan funktiona. Tämän perusteella jo pienet muutokset vastaanottimen paikallisessa ympäristössä riittävät muuttamaan täysin radioaaltojen käyttämät etenemismekanismit.

Verrattaessa makrosoluissa mitattuja tuloksia Har-Xia-Bertoni- ja COST231-WI-malliin, käytettiin etenemismalleissa taulukossa 8 mainittuja parametreja.

Unioninkadulla mitattu suhteellinen tehotaso ja katukuilua pitkin edenneen tehon suhteellinen tehotaso verrattuna etenemismalleihin on esitetty kuvassa 38 ja muuten kuin katukuilua pitkin edennennyttä tehoa on verrattu etenemismalleihin kuvassa 39.

Mittauksessa vastaanotetun tehon hajonta on suuri, mutta sekä COST231-WI- että Har-Xia-Bertoni-malli antavat oikeansuuntaisen arvion, jos jälkimmäisessä käytetään katukuiluetenemisen kaavaa. Muulla tavoin edenneen tehon kaava antaa noin 10 dB suuremman etenemisvaimennuksen.

Vaikka Har-Xia-Bertoni-malli on mikrosolumalli, se on pätevä myös kattotason yläpuolisille antennikorkeuksille. Tällöin jää kuitenkin tulkinnanvaraiseksi, mitä kaavaa milloinkin tulisi käyttää. Käsitteet rinnakkainen katu tai poikittainen katu eivät

## 6. Tulokset

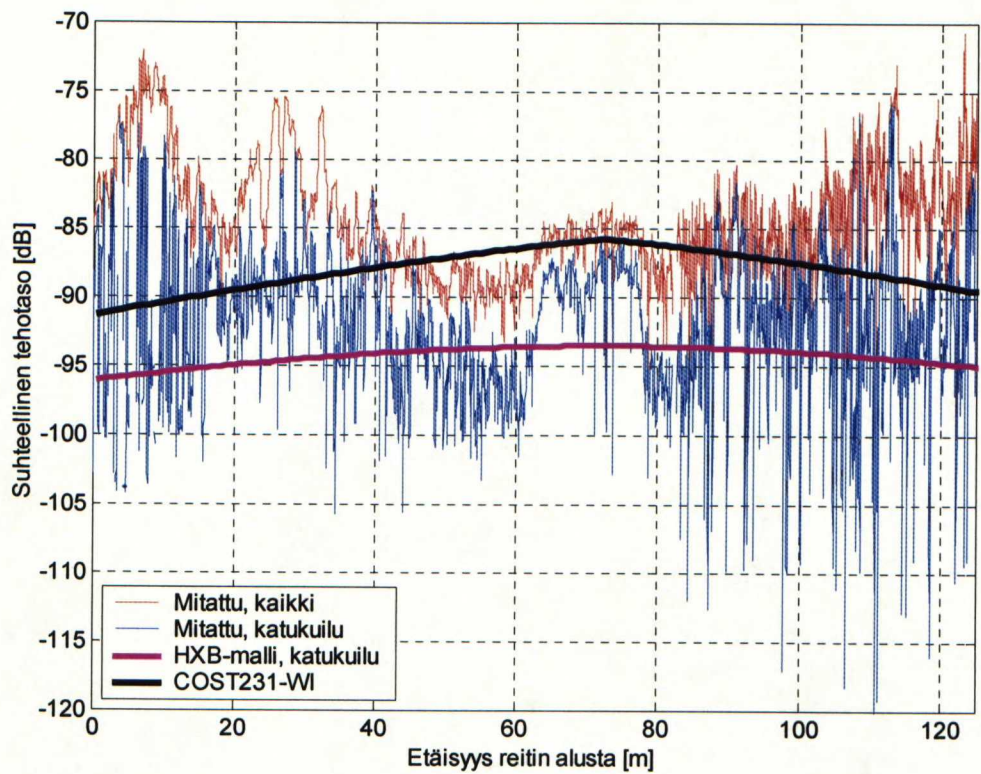
välttämättä ole selviä, jos antenni on kattotason yläpuolella ja osoittaa muualle kuin suoraan pitkittäistä katua kohti.

**Taulukko 8.** Vertailussa käytetyt paramerit malleille makrosolumittauksessa.

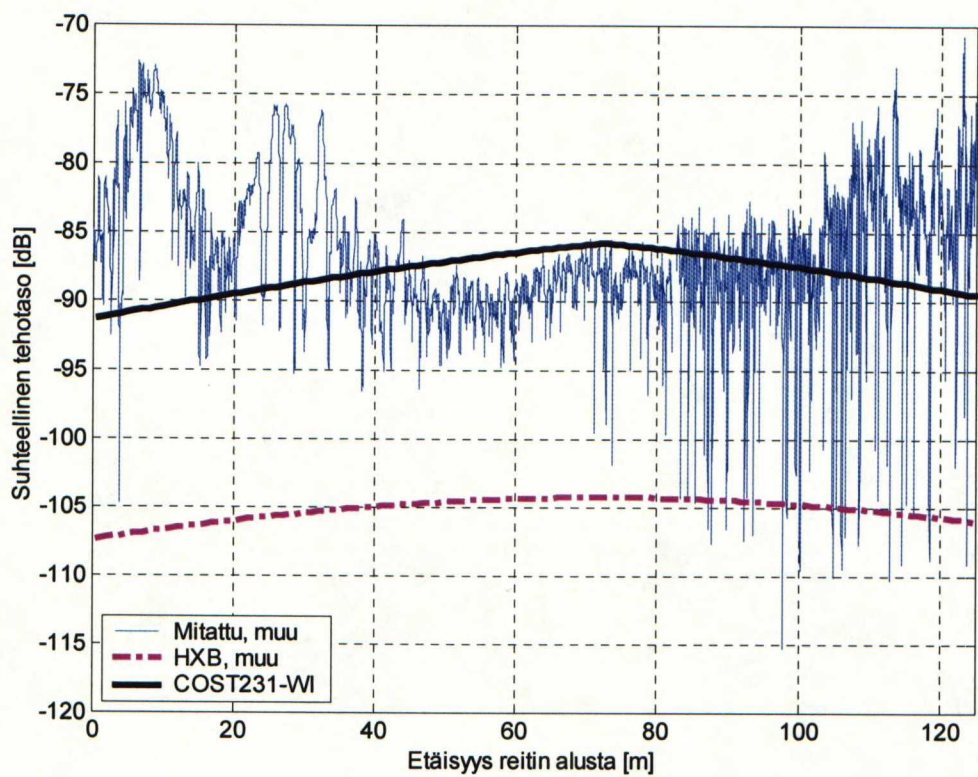
	Har-Xia-Bertoni	COST231-WI
Taajuus	2 GHz	2000 MHz
Tukiasemakorkeus	25 m	25 m
Mobiilin pään korkeus	-	1.6 m
Rakennusten korkeus		
-Unioninkatu	-	10 m
-Liisankatu	-	20 m
-Mannerheimintie	-	20 m
Kadun leveys		
-Unioninkatu	-	15 m
-Liisankatu	-	15 m
-Mannerheimintie	-	50 m
Rakennusten välimatka	-	100 m
Kadun suunta		
-Unioninkatu	-	61° ... 90° ... 67°
-Liisankatu	-	29° ... 63°
-Mannerheimintie	-	86° ... 74°

Mitattu suhteellinen tehotaso on tavallaan erikoinen, sillä se laskee vastaanottimen ja lähettimen välisen etäisyyden pienentyessä. Etäisyys on lyhimmillään reitin puolivälissä. Kaikki etenemismallit käyttävät tärkeimpänä parametrina etäisyyttä ja olettavat etenemisvaimennuksen kasvavan etäisyyden kasvaessa.





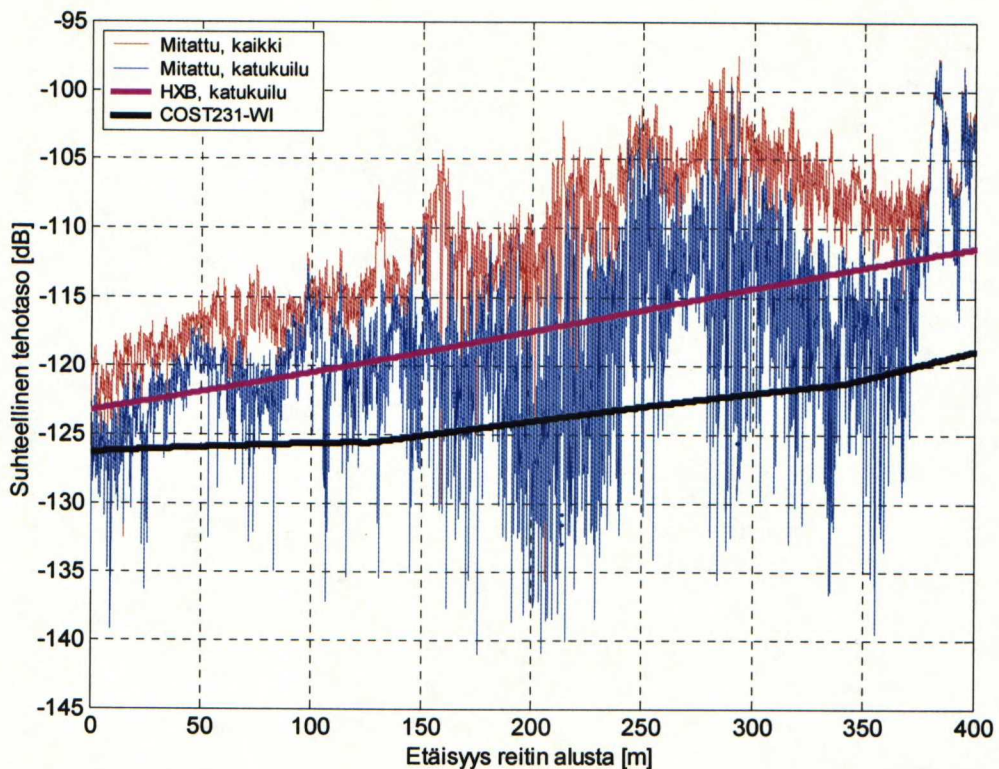
Kuva 38. Mitattu katukuiluetautenuinen verrattuna etenuismalleihin Unioninkadulla.



Kuva 39. Mitattu muu etenuinen verrattuna etenuismalleihin Unioninkadulla.

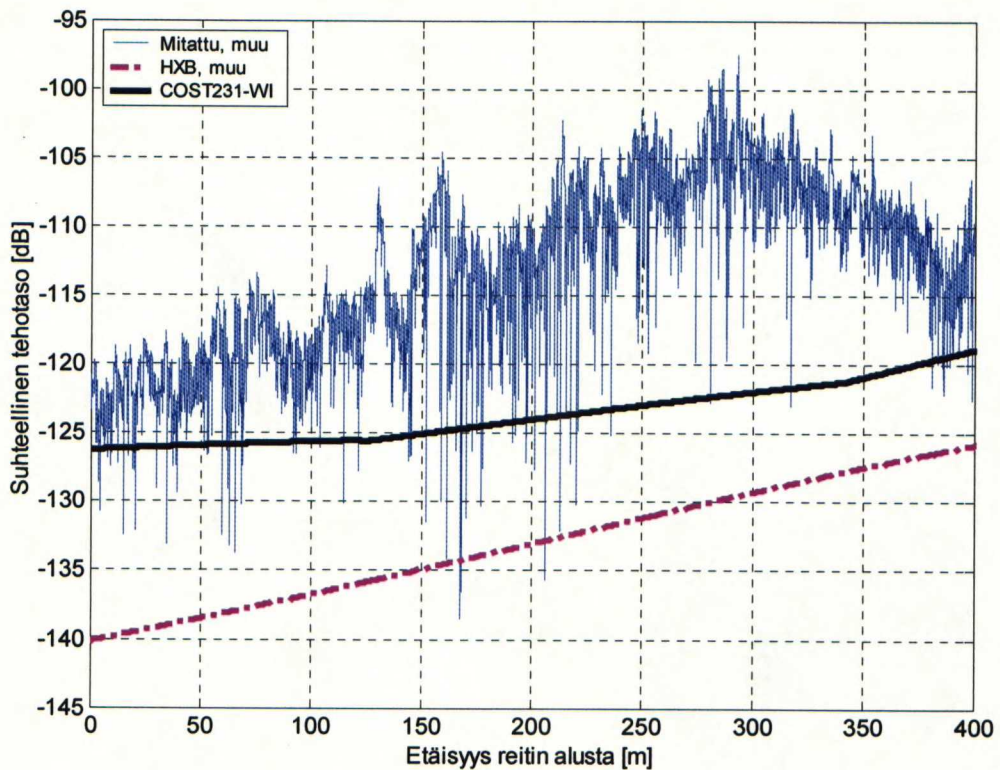
Liisankadun mittaustulokset ja vertailu etenismalleihin on esitetty kuvissa 40 ja 41. Har-Xia-Bertoni-malli on ennustanut katukuiluetenemisen etenemisvaimennuksen erittäin hyvin. COST231-WI-mallin ennustama etenemisvaimennus on 5-10 dB liian suuri. Har-Xia-Bertoni-mallin ennustama muun kuin katukuiluetenemisen etenemisvaimennus on reilusti liian suuri.

Keskimäärin vastaanotettu suhteellinen tehotaso nousee tasaisesti reitin edetessä, reittihän kulkee Liisankatua pitkin viistosti kohti tukiasemaa. Muutoksen suuruuden kaikki etenismallit ennustavat hyvin. Reitin alusta lähtien muulla tavoin edennyt teho muodostaa suurimman osan vastaanotetusta tehosta, ollen noin 5 dB voimakkaampaa kuin katukuilua pitkin edennyt teho. Vasta reitin loppupäässä, yli 370 metriä alusta, alkaa Unioninkatua katukuiluetenemisenä edennyt teho dominoida muulla tavoin edenneen tehon tehotason jäädessä yli 10 dB heikommaksi. Tämä näkyy vielä paremmin etenismekanismien erittelystä kuvassa 36.



Kuva 40. Mitattu katukuilueteneminen verrattuna etenismalleihin Liisankadulla.

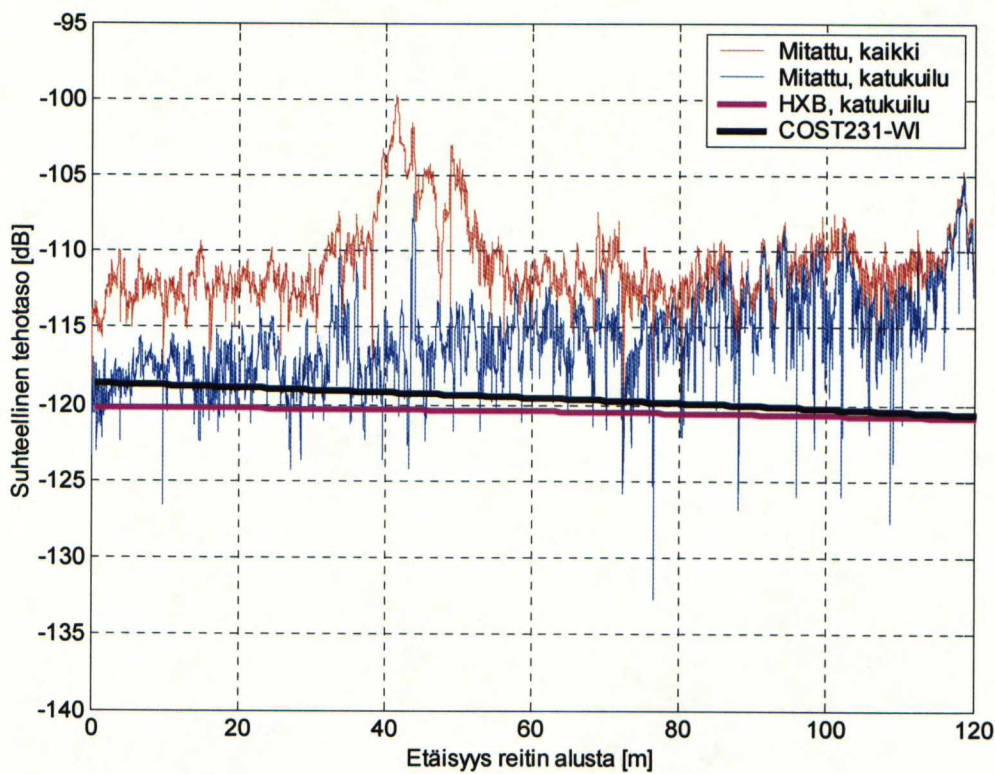




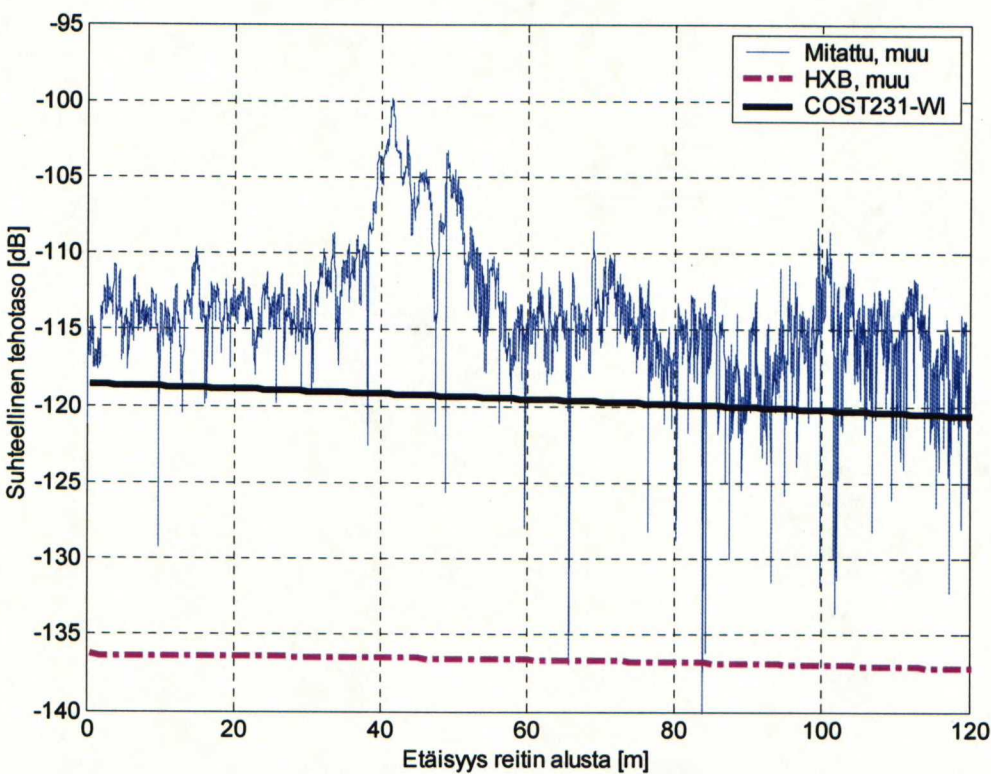
Kuva 41. Mitattu muu eteneminen verrattuna etenemismalleihin Liisankadulla.

Mannerheimintieltä saadut tulokset on esitetty kuvissa 42 ja 43. Har-Xia-Bertoni-mallin katukuiluetenemisen kaava ja COST231-WI-malli antavat lähes yhtenevät tulokset. Har-Xia-Bertoni-mallin muun etenemisen kaava ennustaa reilusti liian suuren etenemisvaimennuksen. Verrattaessa etenemismalleja muulla tavoin edenneeseen tehoon, COST231-WI-malli ennustaa noin 5 dB ja Har-Xia-Bertoni-malli noin 20 dB liikaa etenemisvaimennusta. Huomattavaa on, että HXB-mallin mukaan Mannerheimintiellä tulisi käyttää muun etenemisen kaavaa, eikä tulosten mukaan paremmin toimivaa katukuiluetenemisen kaavaa.

Vastaanottimen ja tukiaseman välinen etäisyys on melkein sama koko reitin ajan, ja etenemismallien antama arvio etenemisvaimennuksesta onkin lähes vakio koko reitin matkalle. Noin 40-50 m päässä reitin alusta vastaanotettu teho kuitenkin nousee väliaikaisesti reilusti. Vertaamalla siinä kaikkea mitattua tehoa ja katukuilua pitkin vastaanotettua tehoa, huomaa hyvin, että nousu ei johdu katukuiluetenemisestä poikittaista katu pitkin kuten mikrosolumittauksissa erityisesti Yliopistonkadulla tapahtuu. Tässä reilusti, noin 10 dB, lisää tehoa vastaanotetaan jotain reittiä katukuiluetenemistä korkeammalta.



Kuva 42. Mitattu katukuilu-eteneminen verrattuna etenemismalleihin Mannerheimintiellä.



Kuva 43. Mitattu muu eteneminen verrattuna etenemismalleihin Mannerheimintiellä.



Makrosolumittauksissa mittaustulosten ja etenemismallien välisiä virhearvioita laskettaessa mittattuja signaaleja ei luokiteltu mitenkään, vaan virheet laskettiin vastaanotetun kokonaistehon avulla. Reittikohtaiset RMS-virheet, keskivirheet ja virheiden keskihajonta on esitetty taulukossa 9.

**Taulukko 9.** RMS-virheet, keskivirheet ja virheiden keskihajonta makrosolumittauksissa.

	RMS-virhe [dB]	Keskivirhe [dB]	Virheen hajonta [dB]
Unioninkatu			
COST231-WI	6.7	-3.3	5.8
HXB, katu	11.0	-9.6	5.3
HXB, muu	21.2	-20.5	5.4
Liisankatu			
COST231-WI	13.6	-12.9	4.1
HXB, katu	7.5	-6.7	3.2
HXB, muu	22.5	-22.3	3.0
Mannerheimintie			
COST231-WI	9.1	-8.7	2.8
HXB, katu	10.0	-9.6	2.7
HXB, muu	25.9	-25.8	2.7

Mikrosolussa saatuihin ennustusvirheisiin verrattuna etenkin keskihajonta on makrosolumittauksissa tuntuvasti pienempi. Makrosolumittauksissa ei juurikaan ole vastaavia suuria hetkellisiä tehotason nousuja kuin mikrosolumittauksissa risteyskiesien läheisyydessä.

Kaikissa makrosolumittauksissa HXB-mallin muun etenemisen kaava ennustaa reilusti liian suuren etenemisvaimennuksen. Sen sijaan COST231-WI ja HXB-mallin katukuiluetenemisen kaavan ennusteet ovat lähellä toisiaan. Näin siitäkin huolimatta, että mallit pyrkivät ennustamaan aivan eri etenemismekanismeja.

### 6.3 Tarkempaa etenemismekanismien erittelyä

Koska eritelty luokat, katukuilua pitkin eteneminen, tukiaseman ja vastaanottimen välisessä pystytasossa eteneminen ja muulla tavoin eteneminen eivät kerro vielä kovin tarkkaan miten radioaalto on edennyt, pyritään tässä muutaman esimerkkitaipauksen avulla tutkimaan, mistä luokat tarkemmin koostuvat. Erityisesti keskitytään luokan muut tutkimiseen, sillä se on kaikista epämääräisin ja saatujen tulosten perusteella pienissä makrosoluissa merkittävin luokka.

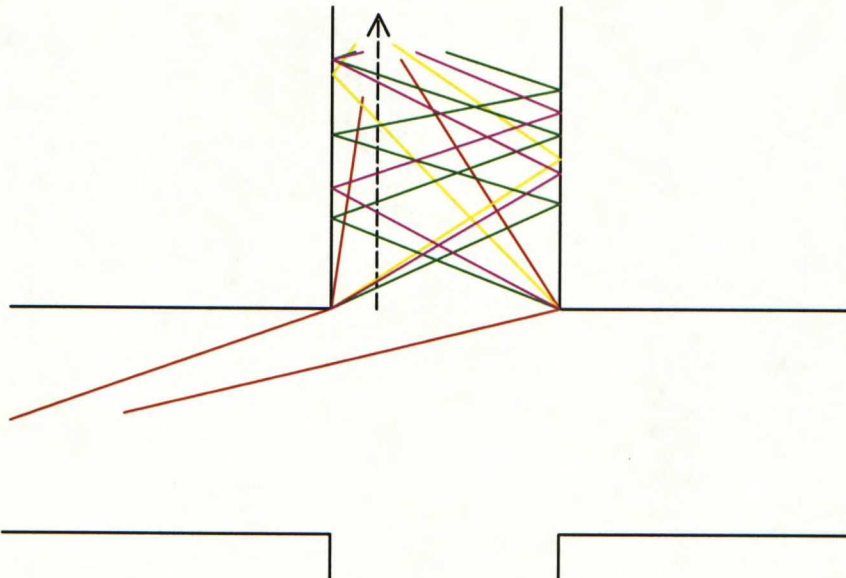
Ensimmäisenä on tutkittu Keskuskadulla mitattua katukuiluetenemistä. Kuvassa 45 on esitetty mitatut katukuiluetenemiseksi luokiteltujen signaalikomponenttien tuloatsimuuttikulmat risteuksesta pois päin edetyn matkan funktiona. Päälle on piirretty kummastakin lähimmästä nurkasta suoraan diffraktoituneen säteen laskennallinen tulokulma, sekä nurkasta diffraktoitumisen jälkeen kerran, kaksi tai kolme kertaa seinästä heijastuneiden säteiden tulokulmat. Kadun leveytenä on pidetty 15 m ja

## 6. Tulokset

vastaanotin on oletettu 2 m päähän lähimmästä seinästä. Kaaviokuva tilanteesta on esitetty kuvassa 44.

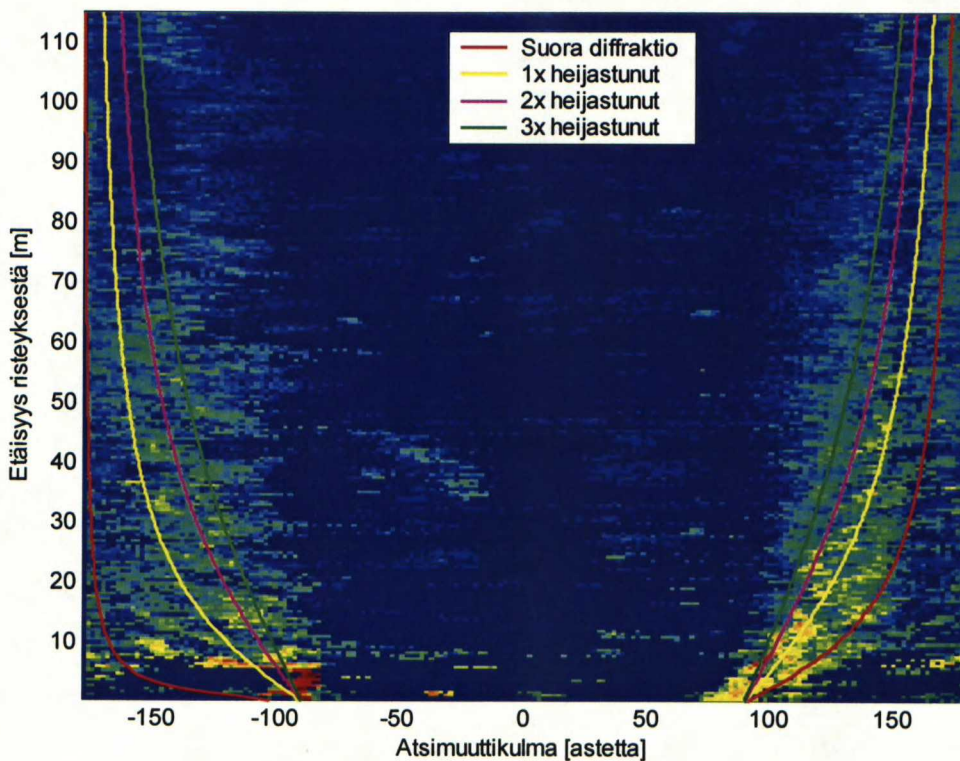
Kuvasta erottuu selvästi että valtaosa tehosta tulee suoraan diffraktoitumalla kadun toisella puolella olevasta nurkasta tai muutaman katukuiluheijastuksen kautta. Läheisen seinän puolelta tehoa vastaanotetaan tuntuvasti vasta heijastuneista säteistä. Aleksanterinkadun toisella puolella olevia nurkkia ei tässä eroteta ollenkaan, ainakaan niistä suoraan diffraktoituneita säteitä. Niiden tulisi tulla kuvassa punaisella merkittyjä suoran diffraktion kulmia suuremmalla atsimuuttikulmalla, eli kulkusuuntaan nähden taaempaa.

Aivan reitin alussa suoraan vasemmalta puolelta vastaanotetaan voimakas signaali. Ensimmäinen rakennus Aleksanterinkadun ja Keskuskadun risteyksestä vasemmalla puolella on matala. Vasta seuraava rakennus on täysikorkea ja sen nurkka nähdään kuvassa 45 vajaan 10 m:n päässä reitin alusta diffraktiolähteenä.



**Kuva 44.** Keskuskadulla mitattu reitti ja lasketut nurkkadiffraktiot.





**Kuva 45.** Katukuiluetenemisenä vastaanotetun tehon tulokulmat ja laskennalliset seinäheijastusten tulokulmat.

Katukuilueteneminen voidaan siis selittää nurkkadiffraktioilla ja säteiden heijastumisella katukuilussa. Muista atsimuuttisuunnista ei merkittäviä määriä tehoa vastaanoteta.

Makrosolumittauksissakin katukuilueteneminen noudattanee viime kädessä samaa tekniikkaa kuin mikrosolussa. Kattojen yli etenemistä on tutkittu vertaamalla kummalta puolelta katua teho on vastaanotettu, eli onko se tullut tukiaseman suunnalta vai vastakkaiselta puolelta takaisinsiroamalla. Kattojen yli edenneeksi luokiteltu teho jaettiin tämän atsimuuttijaon mukaisesti kahteen osaan ja normalisoitiin näytekohteisesti kaikilla makrosolureiteillä. Tukiaseman suunnalta vastaanotetun tehon ja vastakkaiselta suunnalta vastaanotetun tehon osuus kattojen yli tulleesta tehosta on esitetty reiteittäin taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Kattojen yli edenneen tehon erittely suoraan ja vastakkaiselta puolelta tulleiksi.

	Suoraan tukiasemalta [%]	Vastakkaiselta puolelta [%]
Unioninkatu	80	20
Liisankatu	76	24
Mannerheimintie	30	70

Tuloksista voidaan päätellä, että tulosuunnan ratkaisee se, kummalla puolella katua mittausreitti kulkee, valtaosa tehosta saadaan mittausreittiin nähden kadun vastakkaisella puolella olevan rakennuksen kautta huolimatta siitä kummalla puolella



tukiasema sijaitsee. Unioninkadun mittaus ei noudata tätä oletusta, mutta sillä ei toisella puolella katua ole jatkuvasti rakennuksia, jotka voisivat heijastaa tai diffraktoida tehoa. Puolet reitin pituudesta kadun toisella puolella on risteävää tietä tai pihamaata. Reittien sijainnit kadulla on merkitty karttaan, kuva 21. Unioninkadulla ja Mannerheimintiellä kuljetaan tukiaseman puoleista reunaa ja Liisankadulla vastakkaista reunaa.

Muita etenismekanismia voidaan tutkia myös kuten edellä katukuiluetenemistä tulostamalla samaan kuvaan atsimuuttikulman mukaan kattojen yli edenneet ja muulla tavoin edenneet signaalikomponentit. Mannerheimintiellä mitattu kattojen yli eteneminen ja muu eteneminen matkan ja atsimuuttikulman funktiona on esitetty kuvassa 46.

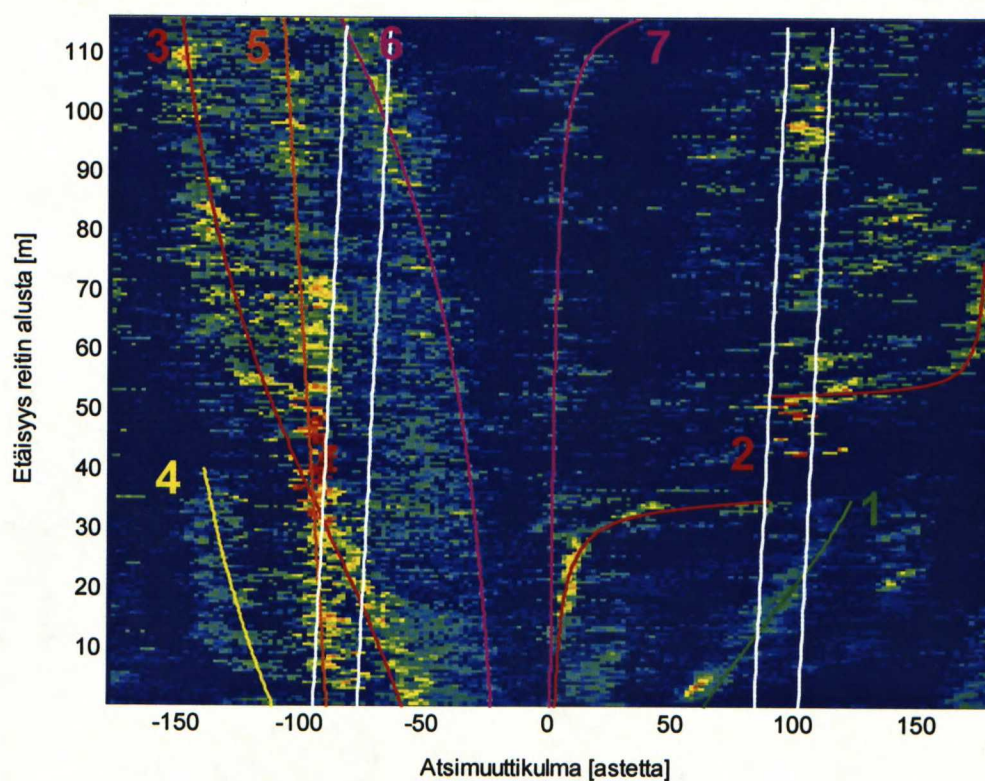
Kuvaan 46 on piirretty reitin päässä olevien rakennusten kulmat. Erityisesti tien toisella puolella oleva kulma, Forumin kulma, näkyy mittaustuloksissa. Muita yhtenäisiä pitkäaikaisia signaalireittejä on tutkittu asettamalla sopivaan paikkaan signaalilähde ja seuraamalla missä kulmassa se näkyisi, kun edetään pitkin reittiä. Kartan avulla havaitut kohteet voidaan jälkeenpäin tunnistaa. Seuratut lähteet etäisyyksineen on esitetty kuvassa 47. Kuvan etäisyydet eivät välttämättä vastaa todellisia etäisyyksiä, vaan kuvaan on metkitty ne sijainnit, joihin sekundäärilähteen sijoittamalla on saatu aikaiseksi mitattuja jatkuvia signaalireittejä kohtuullisen hyvin seuraavat laskennalliset tulosuunnat. Myöhemmin havaittujen signaalireittien etenemisviivettä seuraamalla on voitu varmistaa, vastaako sekundäärilähde todellista, vai onko havaitulle signaalireitille olemassa jokin muu selitys.

Atsimuuttirajauksen rajakulmat on merkitty kuvaan valkoisella. Kaikki viivojen väliin jäävä teho on laskettu kattojen yli edenneeksi ja ulkopuolelle jäävä muuksi etenemiseksi. Selvästikään jatkuvaa ja voimakasta kattojen yli etenemistä ei Mannerheimintiellä mitatulta reitiltä havaita. Ennemminkin valtaosa Mannerheimintiellä kattojen yli edenneeksi luokitellusta tehosta kuuluu luokkaan muut, ja on peräisin havaituista pitkän matkan näkyvistä kohteista.

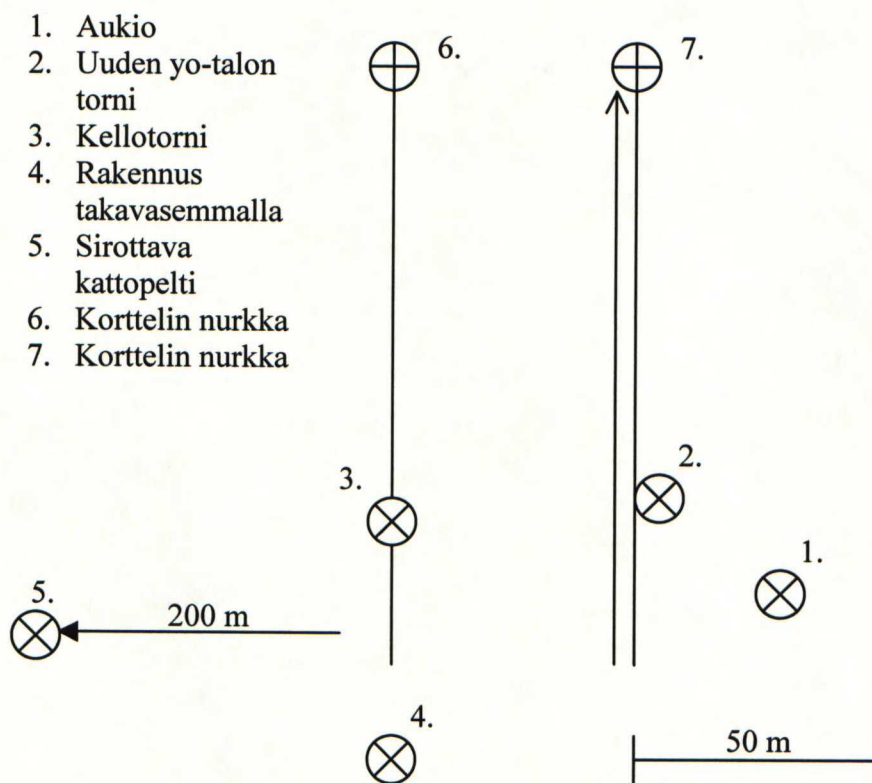
Muut kohteet paitsi numerolla 5 merkitty ovat helposti havaittavissa ja tunnistettavissa katukuvasta. Lähimpien rakennusten nurkat (4, 6 ja 7) erottuvat muuna etenemisenä, samoin katukuilun lähettimen suuntaan rikkova aukio (1) ja keskimääräistä kattotasoa korkeammalla olevat rakennelmat, kellotorni ja uuden ylioppilastalon torni (2 ja 3). Ainoastaan jäljelle jäävä kohde 5 on vaikeammin selitettävissä. Sitä on tutkittu erikseen elevaation, atsimuutin ja viiveen avulla.

Valtaosa muusta etenemisestä näyttää koostuvan pienestä määrästä sirottavia tai diffraktoivia kohteita, joihin luultavimmin on suora näköyhteys sekä lähettimestä että vastaanottimesta.





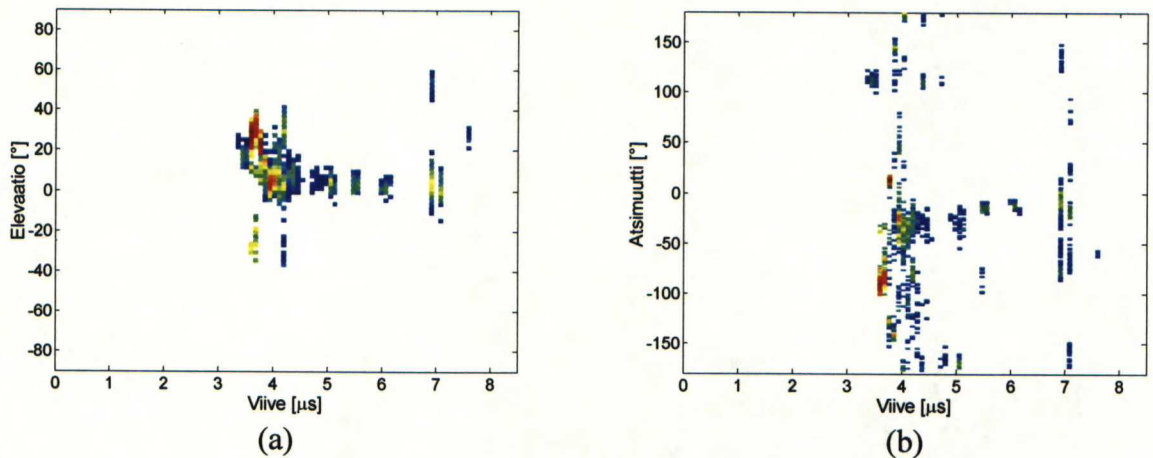
**Kuva 46.** Kattojen yli ja muu eteneminen atsimuuttikulman mukaan Mannerheimintiellä.



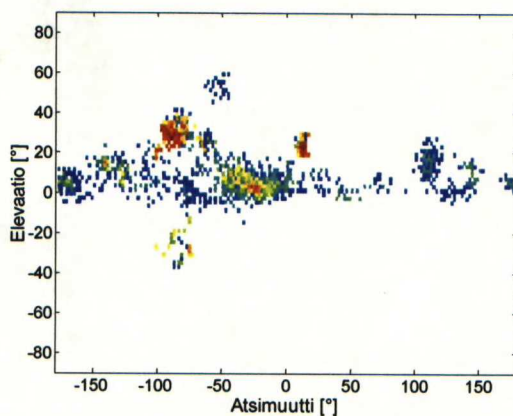
**Kuva 47.** Muun etenemisen merkittävimmät lähteet Mannerheimintiellä.

Kuvassa 48 on esitetty vastaanotetut signaalit atsimuutin ja viiveen sekä elevaation ja viiveen avulla. Kaaviot on piirretty Mannerheimintiellä noin 25 metrin päässä reitin alussa mitattujen tulosuuntien pohjalta. Kuvaan on summattu kaikki vastaanotetut signaalit 2 m:n matkalta. Kuvassa 49 on samat vastaanotetut signaalit esitettynä tulosuuntien atsimuutin ja elevaation avulla. Kohde 5 erottuu kuvissa voimakkaimpana signaalien tulosuuntana, sen elevaatio on noin  $30^\circ$  ja atsimuutti  $-90^\circ$ . Tutkimalla signaalien etenemisviivettä verrattuna muihin vastaanotettuihin signaaleihin, nähdään niiden saapuneen ensimmäisten joukossa. Signaalit eivät siis ole voineet edetä ympäröiviä rakennuksia kaukaisemman kohteen kautta. Kuvasta havaittava katukuilueteneminen, noin  $0^\circ$  elevaatiokulmasta vastaanotettu voimakas signaali, on saapunut vastaanottimelle lähes  $0.5 \mu\text{s}$  myöhemmin. Kohde 5 ei siis oikeasti voi olla 200 m:n päässä, vaan teho on mitä ilmeisimmin sironnut kadun toisella puolella olevasta rakennuksesta.

Toinen voimakas kuvissa esiintyvä  $30^\circ$  elevaatiolla havaittava signaali on vastaanotettu uuden ylioppilastalon tornin suunnalta. Yllättävää siinä on etenemisviive, sillä teho on vastaanotettu hieman edellä kuvattua tien toiselta puolelta sironnutta tehoa myöhemmin. Uuden ylioppilastalon tornin kautta vastaanotetut signaalit eivät siis ole edenneet suoraan lähetyssantennilta uuden ylioppilastalon tornin kautta katukuiluun, vaan signaalireitti on ollut pidempi.



**Kuva 48.** Elevaatio (a), atsimuutti (b) ja viive Mannerheimintiellä.



**Kuva 49.** Atsimuutti-elevaatio-kuva Mannerheimintiellä.



## 7 Johtopäätökset

Työssä tutkittiin radioaaltojen etenismekanismeja kaupunkiympäristössä luokittelemalla vastaanotettuja signaaleita tulosuunnan perusteella. Vastaanotettu teho jaettiin karkeasti kolmeen luokkaan – katukuiluetenemiseksi, kattojen yli etenemiseksi ja muuksi etenemiseksi. Idea tämäntyyppiseen luokitteluun syntyi, koska useat etenismallit olettavat joko katukuiluetenemisen tai kattojen yli etenemisen lähettimen ja vastaanottimen välisessä pystytasossa olevan tärkeintä. Saatuja luokittelutuloksia verrattiin Har-Xia-Bertoni- ja COST231-Walfisch-Ikegami-malleihin.

Tehdyssä luokittelussa kaikki alle  $10^\circ$  elevaatiokulmasta vastaanotettu teho laskettiin katukuilua pitkin edenneeksi. Yli  $10^\circ$  elevaatiokulmasta ja atsimuuttisuunnassa tukiaseman ja vastaanottimen väliseltä pystytasolta vastaanotettu teho laskettiin kattojen yli edenneeksi tehoksi. Tukiaseman suuntaan nähden sallittiin  $\pm 8^\circ$  marginaali. Jäljelle jäävää tehoa käsiteltiin tarkemmin määrittelemättömänä muuna etenemisenä.

Tulosten perusteella mikrosolu ympäristössä pelkkä katukuilu etenemisen huomioiminen riittää. Muut mekanismit muodostivat mittausreitistä riippuen vain noin kymmenesosan vastaanotetusta tehosta. Luokiteltua kattojen yli etenemistä havaittiin mikrosolu ympäristöissä erittäin vähän, alle 2% kaikesta vastaanotetusta tehosta. Poikittaisille kaduille tehon havaittiin diffraktoituvan rakennusten nurkista.

Makrosolu ympäristössä tilanne on toinen. Valtaosa vastaanotetusta tehosta luokiteltiin kaikissa makrosolu ympäristöissä suoritetuissa mittauksissa luokkaan muut noin 45-55% osuudella. Katukuilu etenemiseksi lukeutui vastaanotetusta tehosta 30-42% ja kattojen yli etenemiseksi 12-13%. Perinteiset etenismallit ja kvasi-3D-säteenseuranta olettavat tärkeimmiksi etenismekanismeiksi katukuilua pitkin etenemisen ja suoraan tukiaseman ja vastaanottimen välisessä pystytasossa etenemisen. Näin ei nyt saatujen tulosten mukaan ole. Muu eteneminen ei kuitenkaan aina ole dominoiva mekanismi, vaan hetkittäin mikä vain kolmesta luokasta voi olla voimakkain.

Makrosolumittauksissa tärkeimmäksi luokaksi havaitun muun etenemisen yksityiskohtaisempi tarkastelu osoitti sen koostuvan pienestä määrästä voimakkaita sirottavia tai diffraktoivia kohteita, kuten rakennusten yleistä kattotasoa korkeammat kattorakennelmat ja korkeiden rakennusten nurkat erottuivat selkeästi. Tämän perusteella etenäkään ainoastaan pystytason huomiovat etenismallit, kuten tässäkin työssä käsitelty COST231-Walfisch-Ikegami, eivät ole lähtökohdiltaan kovin hyviä pienen makrosolun tutkimiseen. Suuria makrosoluja ei tässä työssä käsitelty.

Verrattaessa tuloksia etenismalleihin eri reiteille lasketut keskivirheet vaihtelivat paljon. Esimerkiksi COST231-WI:n ennusteen ja mittaustulosten välinen keskivirhe vaihteli reitistä riippuen 1 dB:n ja 28.5 dB:n välillä. Kummatkin ääripäät havaittiin mikrosolu ympäristössä. Makrosolumittauksissa COST231-WI:n keskivirhe oli eri reiteillä 3.3-12.9 dB. Havaittu suuri virhe mikrosolu ympäristössä on selitettävissä

COST231-WI:n rakenteella. Se ei edes yritä arvoida katukuilu-etenemistä, mikrosolu ympäristössä merkittävintä etenismekanismia.

Valitsemalla Har-Xia-Bertoni-mallista aina katukuilu- ja muun etenemisen kaavoista paremman ennusteen antava, oli mallin keskivirhe 4.2-9.6 dB. Makrosolumittauksissa paremman tuloksen antoi aina HXB-mallissa katukuilu-etenemistä ennustava kaava, vaikka sitä ei olisi kuulunutkaan käyttää. Muun etenemisen kaava ennusti makrosolumittauksissa tuntuvasti liian suuren etenemisvaimennuksen. Mikrosolu ympäristössä poikittaisella kadulla mitatulla reitillä HXB-mallin ennusteet olivat hyviä. Se ennusti oikein myös tukiasemakorkeuden vaikutuksen. Rinnakkaisella kadulla se ei päässyt aivan yhtä hyviin tuloksiin.

Kaikenkaikkiaan tulokset osoittavat, ettei radioaaltojen etenemisen käsittely ainoastaan kahden kohtisuoran kaksiuulotteiseen tason avulla ole perusteltua. Tukiaseman ollessa kattotason yläpuolella ratkaiseva rooli on katukuilussa olevaa vastaanotinta ympäröivien rakennusten muodoilla ja erityisesti keskimääräistä kattotasoa korkeammilla kattorakennelmilla.

Mielenkiintoista olisi vielä selvittää, mistä muuksi luokiteltu teho tarkemmin koostuu muilla reiteillä. Tässä eriteltiin muuta etenemistä tarkemmin vain yhdeltä mitatulta reitiltä, ja sitäkin ei selvitetty kattavasti. Ennenkaikkea tärkeää olisi tutkia, onko muuksi etenemiseksi luokitellussa tehossa jonkinlaisia johdonmukaisuuksia tai säännönlaisuuksia, joiden perusteella sitä voisi tilastollisesti mahdollisimman luotettavasti ennustaa.



## Kirjallisuusviitteet

- [1] I. Lindell, K. Nikoskinen, *Antenniteoria*, Otatieto, 1995, 347s.
- [2] I. Lindell, *Radioaaltojen eteneminen*, Otatieto, 1985, 261s.
- [3] K. Nikoskinen, *Sähkömagneetiikan kaavoja*, Otatieto, 1991, 124s.
- [4] T.S. Rappaport, *Wireless communications*, New Jersey, Prentice Hall, 1996, 641s.
- [5] P.D. Holm, "A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Nonperfectly Conducting Wedges", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 8, elokuu 2000, ss. 1211-1219.
- [6] R.G. Kouyoumjian, P.H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface", *Proceedings of IEEE*, vol. 62, lokakuu 1974, ss.1448-1461.
- [7] O. Klemola, A. Lehto, *Tutkatekniikka*, Otatieto, 1998, 275s.
- [8] J. Li, J.F. Wagen, E. Lachat, "Propagation over rooftop and in the horizontal plane for small and micro-cell coverage problems", *VTC'97 - 47<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference*, Phoenix, Arizona, huhtikuu 1997, ss. 1123-1127.
- [9] M. Barbiroli, C. Carciofi, R. De Bernardi, G. Falciasacca, M. Frullone, P.Grazioso, "A new methodology for the identification of validity domains of prediction models in urban environment", *ICUPC '98*, vol. 1, ss. 107-111.
- [10] D.J. Cichon, T. Kurner (ed), "Propagation prediction models", *COST231 Final report*, luku 4, ss.115-208, <http://www.lx.it.pt/cost231/>.
- [11] D. Har, A.M. Watson, A.G. Chadney, "Comment on Diffraction Loss of Rooftop-to-Street in COST231-Walfisch-Ikegami model", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 5, syyskuu 1999, ss. 1451-1452.
- [12] D. Har, H.H. Xia, H.L. Bertoni, "Path-Loss Prediction Model for Microcells", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 5, syyskuu 1999, ss. 1453-1462.

- [13] M.J. Feuerstein, K.L. Blackard, T.S. Rappaport, S.Y. Seidel, H.X.Xia, "Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular System Design", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, elokuu 1994, ss. 487-498.
- [14] J. Litva, C. Wu, A. Ghaforian, "Use of FDTD for simulating the angle of arrival and time delay of signals propagating in indoor environments", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 10, huhtikuu 1996, ss. 930-932.
- [15] X.-Q. Sheng, E. K.-N. Yung, C.H. Chan, J.M. Jin, W.C. Chew, "Scattering from a Large Body with Cracks and Cavities by the Fast and Accurate Finite-Element Boundary-Integral Method", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 8, elokuu 2000, ss. 1153-1160.
- [16] C. Brennan, P. Cullen (ed), "Deterministic modeling", *COST259 Wireless Flexible Personalized Communications*, John Wiley & Sons, 2001, ss. 132-140.
- [17] K.R. Schaubach, N.J. Davis, "Microcellular Radio-Channel Propagation Prediction", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 36, no. 4, elokuu 1994, ss. 25-34.
- [18] M. Honkanen, *Matkaviestinkanavan mallintaminen säteenseurannalla mikrosolu ympäristössä*, diplomityö, TKK Tietoliikennetekniikka, 1995, 77s.
- [19] M. Cord, D. Declercq, "Three-Dimensional Building Detection and Modeling Using a Statistical Approach", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, no. 5, huhtikuu 2001, ss. 715-723.
- [20] G.E. Athanasiadou, A.R. Nix, "Investigation into the Sensitivity of the Power Predictions of a Microcellular Ray Tracing Propagation Model", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 4, heinäkuu 2000, ss. 1140-1151.
- [21] K. Rizk, R. Valenzuela, D.Chizhik, F. Gardiol, "Lateral, Full-3D and Vertical Plane Propagation in Microcells and Small Cells", *VTC'98 - 48<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, 1998, ss.998-1003.
- [22] F.Lotse, A.Wejke, "Propagation measurement for microcells in central Stockholm", *40<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference*, 1990, ss. 539-541.
- [23] J. Kivinen, T.O. Korhonen, P. Aikio, R. Gruber, P. Vainikainen, S.-G. Häggman, "Wideband Radio Channel Measurement System at 2 GHz", *IEEE Transactions on Measurement and Instrumentation*, vol. 48, no. 1, helmikuu 1999, ss. 39-44.
- [24] J. Kivinen, P. Suvikunnas, D. Perez, C. Herrero, K. Kalliola, P. Vainikainen, "Characterization system for MIMO channels", *WPMC'01*, Aalborg, Tanska, syyskuu 2001.



- [25] K. Kalliola, *Experimental multidimensional radio channel characterization*, lissensiaatintyö, TKK Radiotekniikka, 2000, 71s.
- [26] K. Kalliola, H. Laitinen, L.I. Vaskelainen, P. Vainikainen, "Real-Time 3-D Spatial-Temporal Dual-Polarized Measurement of Wideband Radio Channel at Mobile Station", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 2, huhtikuu 2000, ss. 439-448.
- [27] H. Laitinen, *Verification of a stochastic radio channel model using wideband measurement data*, diplomityö, TKK Teknillinen fysiikka, 1999, 68s.